



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

Die deutschen Klimabeobachtungssysteme

Inventarbericht zum Global Climate Observing System (GCOS)



Impressum

Herausgeber und Verlag

Deutscher Wetterdienst
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main
www.dwd.de

Redaktionsteam

Stefan Rösner, Maarit Roebeling,
Andrea Kreis, Grit Steiner,
Gabriele Engel (Koordination englische
Übersetzung)

Gestaltung

Karin Borgmann Grafikdesign

Titelbild

Christian Rohleder/DWD
*MOSAiC-Expedition: Polarstern – Ein Jahr
eingefroren im Nordpolarmeer*

Zitationsvorschlag


Deutscher Wetterdienst, 2023: Die deutschen
Klimabeobachtungssysteme. Inventarbericht
zum Global Climate Observing System (GCOS).
189 Seiten.

ISSN: 2940-2212

ISBN: 978-3-88148-540-1

DOI: 10.5676/dwd_pub/gcos_2023_de

Lizenzhinweise

Die textlichen Inhalte dieser Publikation werden
unter der Lizenz Creative Commons Namens-
 nennung 4.0 International
(CC BY 4.0) zur Verfügung
gestellt, soweit nicht aus-
drücklich anders gekennzeichnet. Ausgenommen
hiervon sind Abbildungen und Fotos. Deren
urheberrechtliche Angaben finden Sie an der
jeweiligen Abbildung beziehungsweise im Foto-
verzeichnis in Kapitel 8.

Die in diesem Bericht veröffentlichten Texte
werden allein von ihren jeweiligen Autorinnen und
Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck
gebrachte Meinung entspricht nicht notwendiger-
weise der Meinung des Herausgebers.

Internetreferenz

www.gcos.de/inventarbericht

Datum der Veröffentlichung

Mai 2023

Danksagung

Zu diesem Inventarbericht haben 88 Autorinnen
und Autoren aus 26 Institutionen und Unternehmen
beigetragen. Sie sind in Kapitel 8 aufgeführt.
Ihnen und ihren Kolleginnen und Kollegen, die im
Hintergrund mitgewirkt haben, ein herzliches
Dankeschön des gesamten Redaktionsteams.

Vorwort

Belastbare Klimainformationen sind für Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft von großer Bedeutung. Kenntnisse über den Zustand des Klimasystems in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft sind die Grundlage für Entscheidungen über Maßnahmen zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz.

Zur Weiterentwicklung dieses Kenntnisstandes ist auch die Forschung in gleicher Weise auf belastbare Daten und Informationen angewiesen. Für die Bereitstellung dieser Informationen sind langfristig angelegte und wissenschaftlich gut fundierte Datenerhebungen sowie Datensammlungen eine grundlegende Voraussetzung.

Die lückenlose Fortsetzung von langfristigen Beobachtungen aller Komponenten des Klimasystems sowie deren



▲ Stefan Schnorr, Staatssekretär im Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)

wissenschaftliche Aufbereitung sind unumgänglich, um Änderungen des Klimas erkennen, das Verständnis von Ursachen vertiefen und rechtzeitig vor dem Auftreten extremer Ereignisse und folgenreicher Veränderungen warnen zu können.

Erst die langen und ununterbrochenen Messreihen ermöglichen die beabsichtigte, frühzeitige Erkennung jeglicher Veränderungen unseres Klimasystems und der damit verbundenen Änderungen in der Häufigkeit und Intensität extremer Wetter- und Klimaereignisse.

Ich freue mich sehr, dass mit der Neuauflage dieses Inventarberichts nun eine aktuelle Übersicht über die laufenden Mess- und Beobachtungsprogramme zur Klimaüberwachung in Deutschland und damit über den deutschen Beitrag zum Global Climate Observing System GCOS vorliegt. Die Zuständigkeiten zur Überwachung der verschiedenen Komponenten des Klimasystems sind hierbei sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene angesiedelt. Ich bedanke mich bei allen Akteuren für ihre wertvollen Beiträge!

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials and a surname, likely belonging to Stefan Schnorr.

Zusammenfassung



◀ Blick von der Wetterwarte des DWD auf den Zugspitzgipfel

Die 1780 in Mannheim gegründete Societas Meteorologica Palatina legte den Grundstein zur globalen Wetter- und Klimaüberwachung.

Dies führte dazu, dass Deutschland auf dem Hohen Peißenberg über eine seit 1781 durchgehende Zeitreihe der bodennahen Lufttemperatur und des Luftdrucks verfügt und die älteste Bergstation der Welt betreibt. Mit Beginn der deutschlandweit systematischen Messungen wurden im Jahr 1881 an 144 Stationen Wetterdaten registriert. Im Jahr

2022 betreibt der Deutsche Wetterdienst ein Messnetz mit 1946 Niederschlagsstationen und 472 Klimastationen.

Deutschland kann damit im Bereich der atmosphärischen und hydrologischen Klimadaten auf lange und weitestgehend auch für die Zukunft gesicherte Beobachtungsreihen zurückgreifen. Die größten Probleme bei der nachhaltigen Fortführung und Sicherung von Beobachtungsreihen bestehen in Deutschland wie auch international bei Ozean- und einigen terrestrischen Beobachtungen.

Auch wenn längst nicht alle Daten deutschlandweit standardisiert verfügbar sind, können – basierend auf instrumentell erhobenen Daten – hinreichend genaue Aussagen über den Verlauf des Klimas in Deutschland gemacht werden.

Die weitere Standardisierung der Messverfahren und die Bereitstellung ganz Deutschland abdeckender Datenreihen stellen zusammen mit der Herkulesaufgabe der Digitalisierung historischer Papierdaten weiterhin die Herausforderungen der näheren Zukunft dar.

Eine integrierte Sicht auf alle für Deutschland relevanten Klimavariablen ist eine notwendige Voraussetzung, um den Aktionsplan Anpassung im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie der Bundesregierung effektiv und nachhaltig umsetzen zu können. Mit dem Klimavorsorgeportal besteht die Möglichkeit, zuständige Institutionen kontaktieren zu können.

Der vorliegende Inventarbericht der nationalen Klimabeobachtungssysteme ist eine Überarbeitung und an einigen Stellen Erweiterung des 2013 veröffentlichten Berichts. Er gibt einen detaillierten Überblick über die hierzulande gemessenen klimarelevanten Größen in Atmosphäre, Ozean und im Bereich der Landoberflächennutzung und stellt somit ein aktuelles, breitgefächertes Kompendium über Klimabeobachtungen in Deutschland für Klimaforschung und Entscheidungsträger bereit. Die Einschätzungen zur Nachhaltigkeit der Beobachtungsprogramme sollen Entscheidungsträger auf potenzielle Risiken hinsichtlich der Fähigkeit zur langfristigen Überwachung des Klimasystems aufmerksam machen.

Inhalt

| | |
|-----------------|---|
| Vorwort | 3 |
| Zusammenfassung | 4 |

1 Einleitung 6

2 Atmosphärische Beobachtungen 12

| | |
|---|----|
| Bodennah | 13 |
| 2.1 Temperatur und Feuchte | 14 |
| 2.2 Wind | 16 |
| 2.3 Luftdruck | 18 |
| 2.4 Niederschlag | 20 |
| 2.5 Strahlung | 24 |
| 2.6 Sonnenscheindauer | 27 |
| Freie Atmosphäre | 29 |
| 2.7 Temperatur, Wind und Wasserdampf in der freien Atmosphäre | 30 |
| 2.8 Wolken | 32 |
| 2.9 Blitzbeobachtungen | 34 |
| Zusammensetzung der Atmosphäre | 37 |
| 2.10 Kohlendioxid | 38 |
| 2.11 Methan | 41 |
| 2.12 Weitere Treibhausgase | 44 |
| 2.13 Anthropogene Treibhausgasflüsse | 47 |
| 2.14 Ozon | 50 |
| 2.15 Aerosole | 53 |
| 2.16 Pollen | 56 |

3 Ozeanische Beobachtungen 59

| | |
|---|-----|
| 3.0 Auswirkungen der weltweiten Erwärmung auf den Ozean | 60 |
| Ozeanphysik | 63 |
| 3.1 Ozeanoberflächen-temperatur | 64 |
| 3.2 Temperatur in der Wassersäule | 67 |
| 3.3 Salzgehalt in der Wassersäule | 70 |
| 3.4 Meeresspiegel | 73 |
| 3.5 Seegang | 76 |
| 3.6 Meereis | 79 |
| 3.7 Meeresströmungen | 82 |
| 3.8 Windschubspannung | 84 |
| 3.9 Oberflächenwärmefluss | 86 |
| Biogeochemie | 88 |
| 3.10 Biomasse/Ocean Colour | 89 |
| 3.11 Nährstoffe | 91 |
| 3.12 Sauerstoff | 93 |
| 3.13 Anorganischer Kohlenstoff im Meer | 96 |
| 3.14 Lachgas (N ₂ O) im Ozean | 99 |
| 3.15 Messung anthropogener Spurengase im Ozean | 102 |
| Ökosysteme | 104 |
| 3.16 Plankton | 105 |
| 3.17 Marine Habitate | 108 |

4 Terrestrische Beobachtungen 110

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Hydrosphäre | 111 |
| 4.1 Abfluss | 112 |
| 4.2 Wassernutzung | 115 |
| 4.3 Grundwasser | 118 |
| 4.4 Seen | 120 |
| Kryosphäre | 123 |
| 4.5 Schneedecke | 124 |
| 4.6 Gletscher und Permafrost | 126 |
| Biosphäre | 129 |
| 4.7 Albedo | 130 |
| 4.8 Kohlenstoff im Boden | 132 |
| 4.9 Oberirdische Biomasse im Wald | 135 |
| 4.10 Waldbrand | 137 |
| 4.11 Bodenfeuchte | 139 |
| 4.12 Phänologie | 141 |

5 Internationale Datenzentren 143

| | |
|---|-----|
| 5.1 Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie | 144 |
| 5.2 Global Runoff Data Centre | 146 |
| 5.3 World Radiation Monitoring Center | 148 |
| 5.4 Weltklimadatenzentrum am Deutschen Klimarechenzentrum | 150 |
| 5.5 World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere | 152 |
| 5.6 ISC-Weltklimadatenzentrum PANGAEA® | 154 |
| 5.7 Zentren zur Qualitätssicherung bei GCOS | 156 |
| 5.8 EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring | 158 |

6 Messreihen im Ausland 160

| | |
|--|-----|
| 6.1 Meteorologische Messungen an der Neumayer-Station in der Antarktis | 161 |
| 6.2 Gletscherüberwachung im Ausland | 163 |

7 Schlussfolgerungen und Ausblick 165

8 Verzeichnisse 172

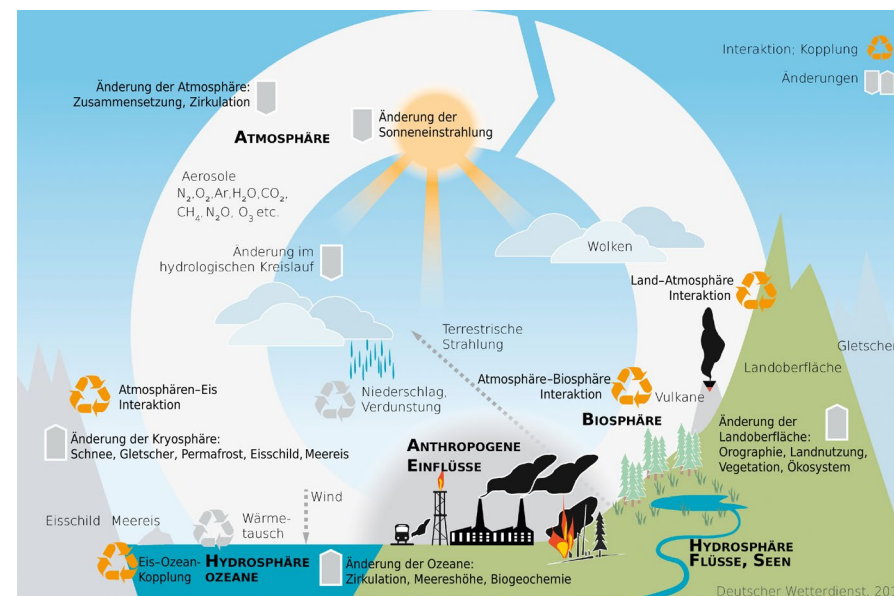
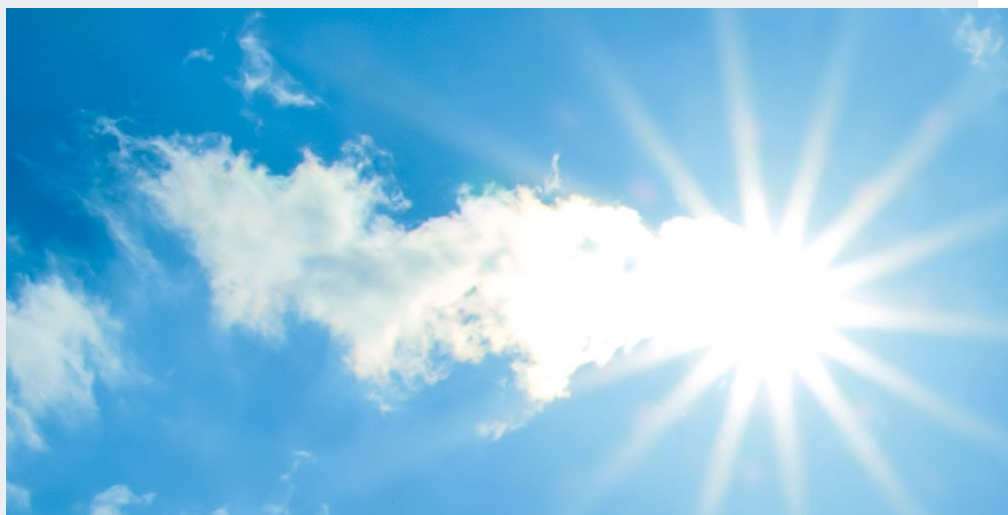
| | |
|------------------------|-----|
| Abkürzungen | 173 |
| Fotos | 180 |
| Autorinnen und Autoren | 183 |
| Literatur | 186 |

Einleitung



Einführung in den Bericht

Seit der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention auf dem Erdgipfel von Rio de Janeiro im Jahr 1992 sind mehr als dreißig Jahre vergangen. Hat sich das öffentliche Augenmerk zu Beginn noch stark auf das Thema Klimaschutz fokussiert, ist in den vergangenen Jahren die Erkenntnis gewachsen, dass zusätzlich eine Anpassung an den Klimawandel unumgänglich geworden ist. Dabei wurde immer deutlicher, dass für klimainformierte Entscheidungen vieljährige sowie qualitativ hochwertige Beobachtungsreihen der wesentlichen Kenngrößen des Klimas unerlässlich, aber vielfach lückenhaft sind. Um diese Klimabeobachtungen global zu koordinieren und ihren Zustand zu dokumentieren, wurde kurz nach dem Erdgipfel von Rio de Janeiro das globale Klimabeobachtungssystem (Global Climate Observing System, GCOS) eingerichtet.



▲ Abb. 1-1: Komponenten des Klimasystems mit ihren physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen (Quelle: DWD)

Klimasystem und Klimabeobachtungen

Unter »Klima« versteht man im Allgemeinen den mittleren Zustand des Wetters an einem Ort, der über eine ausreichend lange Zeit erfasst wurde und damit durch statistische Größen beschrieben werden kann. International hat man sich auf 30-jährige Zeiträume geeinigt, für die statistische Größen wie Mittelwerte (z. B. der bodennahen Lufttemperatur), Häufigkeiten (z. B. für die Über- oder Unterschreitung von Schwellenwerten) oder Extremwerte berechnet werden. Je länger die betrachteten Zeiträume sind, desto repräsentativer sind in der Regel die statistischen Aussagen.

Das Klima an einem Ort wird dabei durch eine Vielzahl von Prozessen und

Entwicklungen beeinflusst. Zum Verständnis der Wirkungszusammenhänge im Klimasystem muss nicht nur der Zustand der Atmosphäre, sondern in gleichem Maße auch der Zustand der Ozeane und der Landoberflächen und deren Änderungen über lange Zeiträume beobachtet und beschrieben werden. Atmosphäre, Ozean und Landoberflächen bilden die Komponenten des Klimasystems. Da viele Änderungen in diesen Komponenten durch den Menschen beeinflusst oder sogar verursacht werden, können sozio-ökonomische Fakten ebenfalls nicht ignoriert werden. Abbildung 1-1 stellt die physikalischen, chemischen und biologi-



schen Wechselwirkungen im Klimasystem dar.

Beobachtungen, in diesem Fall des Klimasystems, ermöglichen es der Forschung, modellhafte Vorstellungen über die Zusammenhänge und Wirkungsweisen zu entwickeln. Dieses Verständnis ist Voraussetzung, um mithilfe mathematisch-physikalischer Modelle (hier: Klimamodelle) die Beobachtungen nachzuvollziehen, Vorstellungen zu überprüfen und dann darauf aufbauend unter gewissen Annahmen vertrauenswürdige Projektionen für zukünftige Entwicklungen erstellen zu können.

Die sechs Sachstandsberichte (1990, 1995, 2001, 2007, 2014, 2021) des zwischenstaatlichen Klimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, auch als Weltklimarat bezeichnet) dokumentieren, wie sich Erkenntnisse zum Klimageschehen und Klimamodelle in den vergangenen Jahrzehnten entwickelt haben. Viele dieser neuen Erkenntnisse für das Verständnis des Klimasystems und daraus abgeleitete Modellverbesserungen sind den Beobachtungsdaten und ihrer umfangreichen Auswertung zu verdanken.

Bereits der erste IPCC-Sachstandsbericht wies auf die Notwendigkeit einer Verbesserung der systematischen Beobachtung klimarelevanter Variablen auf globaler Ebene hin (IPCC 1990). Die Teilnehmer der zweiten Weltklimakonferenz (WCC-2) forderten 1992 dann konkret die Einrichtung eines »Global Climate Observing System« (WMO 1990). GCOS wurde 1992 gemeinsam von der Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen (WMO),

dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP), der zwischenstaatlichen ozeanographischen Kommission der UNESCO (IOC) und dem Internationalen Wissenschaftsrat (ISC) eingerichtet. Im Rahmen von GCOS hat man seitdem in verschiedenen Berichten den Zustand der globalen Klimabeobachtungssysteme analysiert, Pläne zur Schließung von Defiziten bei den Beobachtungssystemen erarbeitet und die Fortschritte bei der Umsetzung dieser Pläne dokumentiert.

Anforderungen an die Klimabeobachtungen

Die grundsätzlichen Anforderungen an das GCOS-Programm wurden schon bei dessen Gründung 1992 beschrieben. Eine Konkretisierung dieser Anforderungen erfolgte in einem detaillierten Bericht zum Zustand der globalen Klimabeobachtungssysteme (WMO 2003b). Diese umfassen:

1. Charakterisierung des Zustandes und der Variabilität des globalen Klimasystems:

Zur Beschreibung des Klimasystems ist es erforderlich, eine Vielzahl von Variablen aus den Bereichen Atmosphäre, Ozean und Landoberflächen zu erheben. Um die zeitlichen Veränderungen dieser Variablen genau erfassen und Ursachen zuordnen zu können, ist eine hohe Genauigkeit, gute Homogenität und langfristige Kontinuität der Messreihen unabdingbar.

2. Überwachung der das Klimasystem beeinflussenden natürlichen und anthropogenen Faktoren:



▲ Foto 1-1: Haloerscheinungen über dem Messfeld des DWD auf dem Fichtelberg

In den vergangenen Jahrhunderten und Jahrtausenden waren es Variationen der natürlichen Faktoren wie Sonneneinstrahlung und Vulkanismus, die die Variabilität des Klimas bestimmt haben. Heute kommen anthropogene Ursachen hinzu. Hierzu zählen die Emission von Treibhausgasen und die Luftverschmutzung, aber auch Landnutzungsänderungen.

3. Unterstützung bei der Zuordnung von Ursachen für Klimaänderungen:

Die unter 1. und 2. beschriebene Überwachung des Klimasystems dient auch der Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Ele-

menten und der Zuordnung von Ursachen für Veränderungen. Hierzu werden mithilfe der Beobachtungsdaten Modelle entwickelt, mit denen in Modellexperimenten die Ursachen und Zusammenhänge erforscht werden können und eine Unterscheidung zwischen anthropogenen und natürlichen Ursachen möglich wird.

4. Unterstützung von Klimavorhersagen:

Zur Vorhersage des Klimas muss nicht nur die Entwicklung der unter 2. genannten Variablen, sondern auch der Anfangszustand des Klimasystems betrachtet werden. Lange Beobachtungsreihen der wichtigsten Klimavariablen dienen darüber hinaus auch der Beurteilung ■ ■ ■

| Klima-komponente | Teilkomponente | Essentielle Klimavariablen |
|------------------|---|--|
| Atmosphäre | bodennah | Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Wasserdampf, Luftdruck, Niederschlag, bodennahe Strahlungsbilanz |
| | freie Atmosphäre | Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Wasserdampf, Wolkeneigenschaften, Strahlungsbilanz der Erde, Blitze |
| | Zusammensetzung | Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), weitere langlebige Treibhausgase, Ozon, Aerosol, Vorläufersubstanzen für Aerosol und Ozon, <i>Pollen</i> |
| Ozean | Physik | Temperatur und Salzgehalt an der Oberfläche und darunter, Strömungen, Oberflächenströmungen, Meeresspiegel, Seegang, Meereis, Windschubspannung, Wärmefluss an der Ozeanoberfläche |
| | Biogeochemie | Anorganischer Kohlenstoff, Sauerstoff, Nährstoffe, transiente Spurenstoffe, Lachgas (N ₂ O), Ocean Colour |
| | Biologie/Ökosysteme | Plankton, Eigenschaften mariner Habitate |
| Land-oberfläche | Hydrologie | Abfluss, Grundwasser, Seen, Bodenfeuchte |
| | Kryosphäre | Schnee, Gletscher, Inland- und Schelfeis, Permafrost |
| | Biosphäre | Albedo, Oberflächenbedeckung, photosynthetische Aktivität, Blattflächenindex, oberirdische Biomasse, Kohlenstoff im Boden, Feuer, Erdbodenoberflächentemperatur, <i>Phänologie</i> |
| | Nutzung natürlicher Ressourcen durch den Menschen | Wassernutzung, Treibhausgasflüsse |

▲ Tabelle 1-1: Essentielle Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs) gemäß GCOS-Implementierungsplan mit den für Deutschland zusätzlich relevanten Variablen *Pollen* und *Phänologie* (Quelle: DWD nach WMO 2016)



und Weiterentwicklung von Klimamodellen.

5. Projektion globaler Klimaänderungsinformationen auf die regionale und nationale Ebene:

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung an den Klimawandel sind vor allem auf nationaler und lokaler Ebene spürbar bzw. erforderlich. Zu den unter 1. angesprochenen Variablen müssen auf dieser Ebene daher zusätzliche und detailliertere Informationen vorliegen, damit regionale Klimamodelle entwickelt und die Wirkungsweise des Klimas auf die natürlichen Systeme besser verstanden werden können.

6. Charakterisierung extremer Ereignisse zur Abschätzung von Auswirkungen, Risiken und Verwundbarkeit:

Die Klimabeobachtungsdaten sollen die Charakterisierung extremer Ereignisse wie Hochwasser, Hitze und Stürme ermöglichen, damit entsprechende Wirkungsanalysen durchgeführt, Richtlinien erlassen und Anpassungsstrategien bzw. -aktionspläne erarbeitet werden können.

Damit diese Anforderungen erfüllt werden können, hat GCOS zusammen mit dem IPCC und dem Weltklimaforschungsprogramm (World Climate Research Programme, WCRP) eine Auswahl der wichtigsten Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs) vereinbart (Tabelle 1-1).

Bei der Auswahl wurde neben den wissenschaftlichen Anforderungen

auch berücksichtigt, inwieweit die Beobachtung dieser ECVs im globalen Maßstab für die Klimaüberwachung umgesetzt werden kann. Im Zuge neuer Forschungsergebnisse, fortschreitender Messtechnik und neuen Nutzeranforderungen können bei Bedarf weitere Variablen hinzukommen.

Neben diesen erstmals 2003 festgelegten globalen ECVs kann es auf nationaler Ebene Anforderungen für weitere zu beobachtende Klimavariablen geben, die nicht zu den ECVs zählen, aber bereits seit langer Zeit systematisch erhoben werden und signifikant zur Charakterisierung des Klimas und seiner Veränderungen auf der lokalen Ebene beitragen. In Deutschland zählen hierzu *Pollen* und *phänologische* Beobachtungen.

Um sicherzustellen, dass in den langen Zeitreihen nationaler In-situ-Beobachtungen möglichst nur die großräumigen Veränderungen enthalten und diese im internationalen Maßstab vergleichbar sind, hat GCOS zehn Prinzipien zur Klimaüberwachung festgelegt, die GCOS Climate Monitoring Principles (siehe Tabelle 1-2; Karl et al. 1995, WMO 2003b).

Die Beobachtung des Klimas hat in Deutschland eine lange Tradition. Grundlagen wurden bereits durch Alexander von Humboldt (1769–1859) sowie um 1780 durch die Societas Meteorologica Palatina, auch Mannheimer Meteorologische Gesellschaft genannt, gelegt. Seitdem tragen deutsche Institutionen national und international zur systematischen Beobachtung des Klimasystems bei. ■ ■ ■

Die GCOS-Prinzipien zur Klimaüberwachung

1. Die Auswirkungen einer Einführung neuer Systeme oder einer Veränderung bestehender Systeme sind vor der Umsetzung abzuschätzen.
2. Für den Übergang zwischen alten und neuen Beobachtungssystemen ist ein ausreichend langer Überlappungszeitraum zu gewährleisten.
3. Detaillierte Informationen über den Standort, seine Entwicklungsgeschichte, die Instrumente, Betriebsweisen, Datenverarbeitungsalgorithmen und sonstige für die Datenauswertung relevanten Fakten (d. h. Metadaten) sind mit gleicher Sorgfalt zu behandeln und zu dokumentieren wie die erhobenen Daten selbst.
4. Die Qualität und Homogenität der Daten ist im Routinebetrieb regelmäßig zu überprüfen.
5. Die Anforderungen an Umwelt- und Klimaüberwachungsprodukte und Bewertungen, wie z. B. die IPCC-Bewertungen, sind bei der Prioritätenfindung für die nationalen, regionalen und globalen Beobachtungsaktivitäten zu berücksichtigen.
6. Stationen und Beobachtungssysteme mit historisch ununterbrochenen Beobachtungsreihen sollten fortgeführt werden.
7. Datenarme Gebiete, weniger häufig beobachtete Parameter, Regionen mit besonderer Empfindlichkeit für Veränderung und Messungen von Schlüsselparametern mit unzureichender zeitlicher Auflösung sind bei der Konzeption zusätzlicher Beobachtungsmaßnahmen vorrangig zu behandeln.
8. Für die Konzeption und Implementierung von Systemen müssen die Langzeit-Anforderungen, einschließlich der entsprechenden Beobachtungshäufigkeiten, den Netzwerkdesignern und -betreibern sowie Messgerätespezialisten von vornherein bekannt sein.
9. Die sorgfältig geplante Überführung von Beobachtungssystemen zu Forschungszwecken in langfristige Beobachtungsprogramme ist zu fördern.
10. Datenmanagementsysteme zur Erleichterung des Zugangs sowie der Nutzung und Auswertung von Daten und Produkten sollten grundsätzlich in Klimaüberwachungssystemen enthalten sein.

▲ *Tabelle 1-2: Die 10 Prinzipien wurden bei der 5. Vertragsstaatenkonferenz (COP 5) zum Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen zur Kenntnis genommen und durch den 14. WMO-Kongress im Mai 2003 angenommen. (Quelle: DWD nach Karl et al. 1995, UNFCCC 2000 und WMO 2003a)*



Aktuell umfassen die für Deutschland relevanten systematischen Beobachtungen nahezu alle ECVs (siehe Tabelle 1-1).

Die Daten werden in der Regel einer strengen Qualitätsüberprüfung unterzogen und größtenteils an internationale Datenzentren übermittelt, von denen einige von deutschen Institutionen betrieben werden. Dort stehen sie internationalen Forschergruppen für integrierte globale Untersuchungen, insbesondere zum Klimawandel, und operationell agierenden Einrichtungen zur Verfügung. Deutsche Institutionen unterstützen auf diese Weise die Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit und Standardisierung der Messdaten.

Zur Koordination nationaler und zur Unterstützung internationaler GCOS-Aktivitäten wurde bereits im Herbst 1992, also unmittelbar nach Gründung des GCOS-Programms, ein nationales GCOS-Sekretariat beim Deutschen Wetterdienst (DWD) eingerichtet. Kurz darauf wurde 1993 die Broschüre »GCOS – The German View« herausgegeben, die eine erste kurze Bestandsaufnahme der deutschen Beiträge zu GCOS lieferte. Im Jahr 2013 erschien erstmalig die Publikation »Die deutschen Klimabeobachtungssysteme – Inventarbericht zum Global Climate Observing System (GCOS)«. Zur Verbesserung der Zusammenarbeit mit den Institutionen, die in Deutschland für die Durchführung der Klimabeobachtungen verantwortlich sind, und zur Abstimmung der deutschen Beiträge zu GCOS werden seit 1998 regelmäßig nationale GCOS-Treffen durchgeführt.

Motivation für den Inventarbericht

Die über die vielen Jahrzehnte gesammelten Klimadaten stellen für die verantwortlichen Institutionen inzwischen einen wertvollen historischen Schatz dar und sind von hoher wissenschaftlicher Bedeutung für die nationale und internationale Klimaforschung. Diese Daten sind Teil unseres Kulturgutes, die – einmal verloren – nicht wiederhergestellt werden können. Der Erhalt und die Fortsetzung langer Beobachtungsreihen ist eine ständige Herausforderung für alle Verantwortlichen. Insbesondere lange Beobachtungsreihen, deren Erhebung durch befristet bewilligte Forschungsgelder finanziert wird, sind gefährdet.

Eine Gefährdung anderer Art ergibt sich daraus, dass noch immer viele Daten auf alten Datenträgern oder nur auf Papier vorliegen und somit modernen Analysen nicht zur Verfügung stehen. Ohne entsprechende Maßnahmen ist daher auch der Totalverlust dieser historischen Daten möglich. In Deutschland ist zudem die Überwachung klimarelevanter Parameter auf eine Vielzahl von Bundes- und Landesbehörden sowie Forschungsinstitutionen verteilt. Mit dem vorliegenden Bericht soll daher ein Überblick über den derzeitigen Stand ermöglicht und über die Nachhaltigkeit der Weiterführung dieser Beobachtungen informiert werden.

Vorgehensweise

Aufgrund der Verpflichtungen aus der Klimarahmenkonvention erstellt die Bundesregierung regelmäßig ■ ■ ■



Nationalberichte zu deren Umsetzung. Diese Berichte enthalten alle jeweils ein Kapitel über »Forschung und systematische Beobachtung« in Deutschland. Im 3. Nationalbericht (Bundesregierung 2002) wurde erstmalig ausführlicher über die Beiträge Deutschlands zur systematischen Klimabeobachtung berichtet. Der jüngste (8.) Nationalbericht wurde Anfang 2023 vorgelegt (Bundesregierung 2023). Die Nationalberichte geben jedoch nur einen sehr groben Überblick über die Klimabeobachtungsaktivitäten Deutschlands und folgen einer international vorgegebenen Struktur, damit sie im internationalen Kontext besser verglichen werden können. Um erstmals einen umfassenden und anschaulichen Überblick über die Klimabeobachtungen in Deutschland zu geben, wurde beim 6. Nationalen GCOS-Treffen im März 2011 die Erstellung einer entsprechenden Broschüre beschlossen. Vorbild war damals der 2007 erschienene Bericht »Nationales Klima-Beobachtungssystem – Global Climate Observing System – GCOS Schweiz« (Seiz und Foppa 2007). Dieser wurde zuletzt 2018 aktualisiert (siehe www.gcos.ch).

Aufbau des Berichts

Basierend auf dem 2016er GCOS-Implementierungsplan (WMO 2016) werden die für Deutschland wesentlichen Klimavariablen einzeln dargestellt, bei enger fachlicher Nähe teilweise auch in einem Abschnitt zusammengefasst. Die Kapitel 2 bis 4 beinhalten Informationen zu den Klimavariablen aus Atmosphäre und Ozean sowie den terrestri-

schen Beobachtungen. Zu jeder hier beschriebenen Beobachtungsgröße werden, soweit möglich, Informationen zu gesetzlicher Grundlage, Klimasignalen, internationaler Einbettung und wissenschaftlichem Nutzen sowie dem Ressourcenbedarf gegeben. Kapitel 5 befasst sich mit den internationalen Datenzentren in Deutschland und Kapitel 6 mit den von Deutschland im Ausland oder außerhalb seiner Hoheitsgebiete durchgeführten Beobachtungsaktivitäten. Die in internationalen Gewässern durchgeführten Ozeanbeobachtungen sind bereits in die jeweiligen Beiträge in Kapitel 3 integriert. In Kapitel 7 werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf das nationale Klimabeobachtungssystem (GCOS-DE) gegeben.

Die Übersicht über die Autorinnen und Autoren, das Literaturverzeichnis, die verwendeten Abkürzungen und der Fotonachweis stehen für alle Kapitel zusammen am Ende des Berichts. Abbildungen wurden in Hinblick auf Einheitlichkeit und Barrierefreiheit, soweit dies möglich war, überarbeitet und darin enthaltene Texte gegebenenfalls übersetzt.

Ergebnisse der COP 27 in Sharm el-Sheikh

Indem GCOS regelmäßig über den Zustand der Klimabeobachtungssysteme berichtet und Implementierungspläne zur Schließung von Defiziten vorlegt, soll auf eine Verbesserung der globalen Klimabeobachtungen, unter Berücksichtigung der Nutzeranforderungen, hingearbeitet werden.



Im September 2022, nach Redaktionsschluss für die Fachkapitel 2–6, erschien eine neue Fassung des GCOS-Implementierungsplans (WMO 2022) und wurde der 27. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention (COP 27) vorgelegt. Die neu hinzugekommene ECV »Anomalie des terrestrisch gespeicherten Wassers« konnte daher im vorliegenden Bericht noch nicht berücksichtigt werden.

Ein Ergebnis der COP 27 ist der Beschluss des Nebenorgans für Wissenschaftliche und Technologische Beratung (SBSTA), der zur Umsetzung des Plans auffordert (UNFCCC 2022b). Im dazugehörigen Beschluss der Vertragsstaaten wird unter anderem zur Schließung von Lücken in den Beobachtungssystemen aufgerufen (UNFCCC 2022a).

2

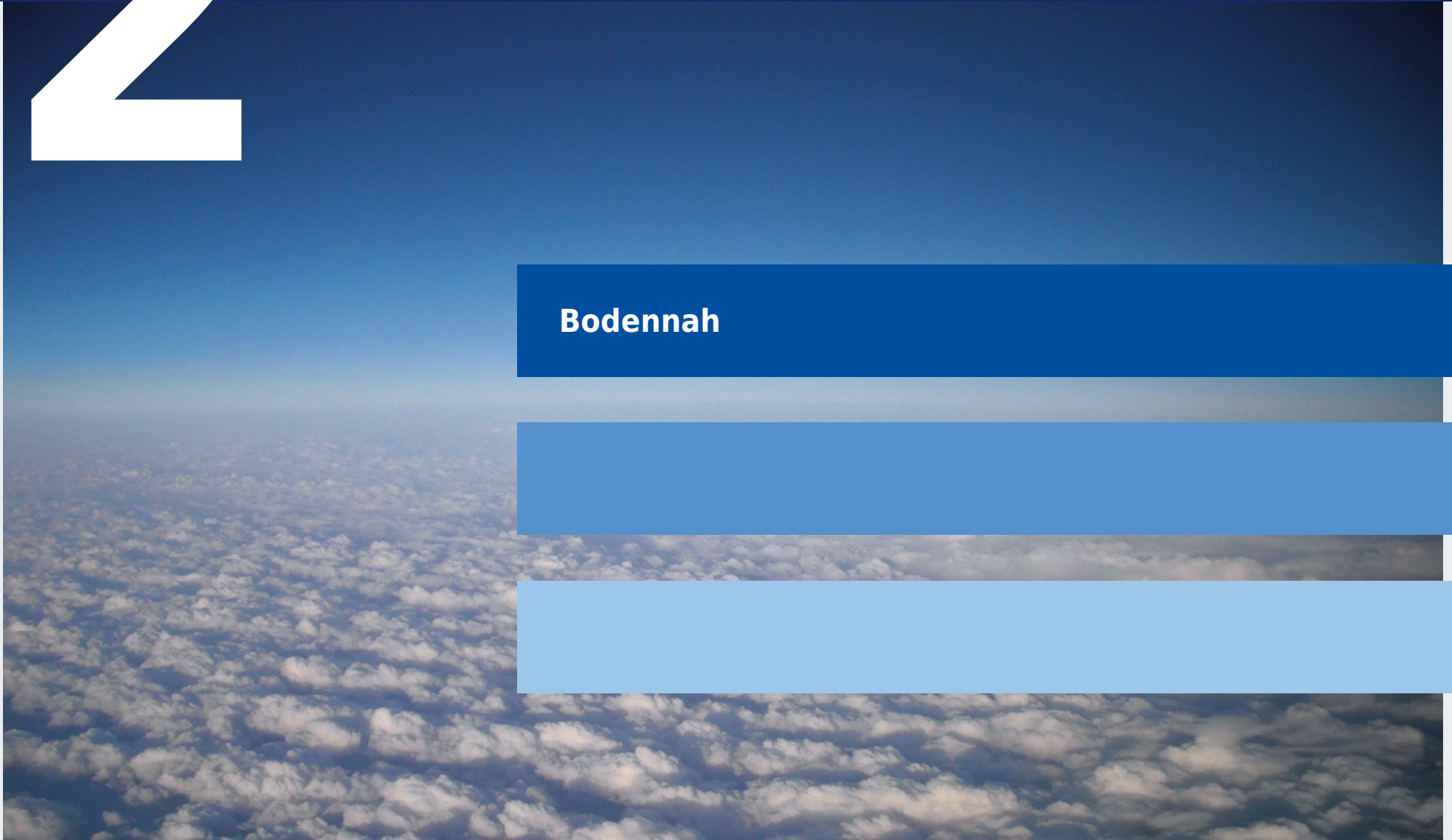
Atmosphärische Beobachtungen



2

Atmosphärische Beobachtungen

Bodennah

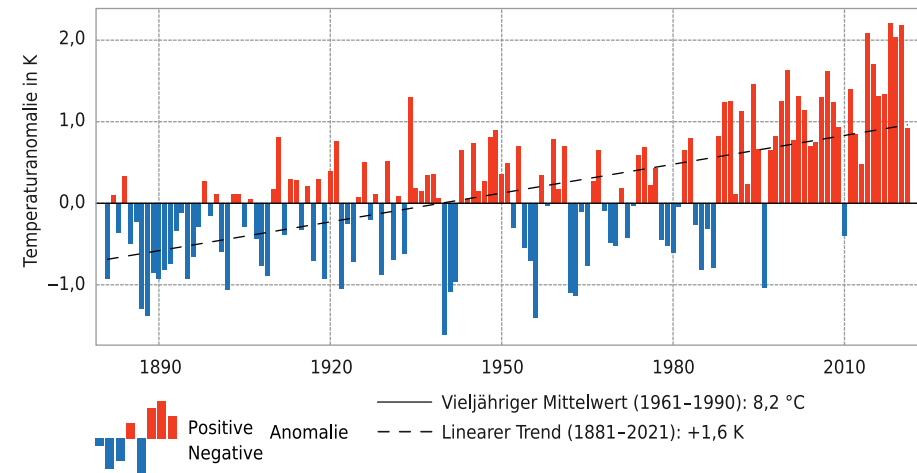


2.1 Temperatur und Feuchte

Die Temperatur stellt einen der Hauptindikatoren zur Beschreibung des Klimas und seiner Veränderungen dar. Daher ist die Beobachtung und Analyse dieses Parameters sowohl auf nationaler, als auch auf globaler Ebene von besonderer Bedeutung. Die vorliegenden Messreihen dokumentieren auch in Deutschland deutlich die fortschreitende anthropogene Klimaerwärmung.



Zeitreihe der jährlichen Mitteltemperatur für Deutschland 1881-2021



▲ Abb. 2.1-1: Die Zeitreihe zeigt einen deutlichen Temperaturanstieg, insbesondere ist ab ca. 1970 ein weitgehend linearer Verlauf sichtbar, der konsistent zum globalen Temperaturanstieg verläuft. (Quelle: DWD)

Klimasignale

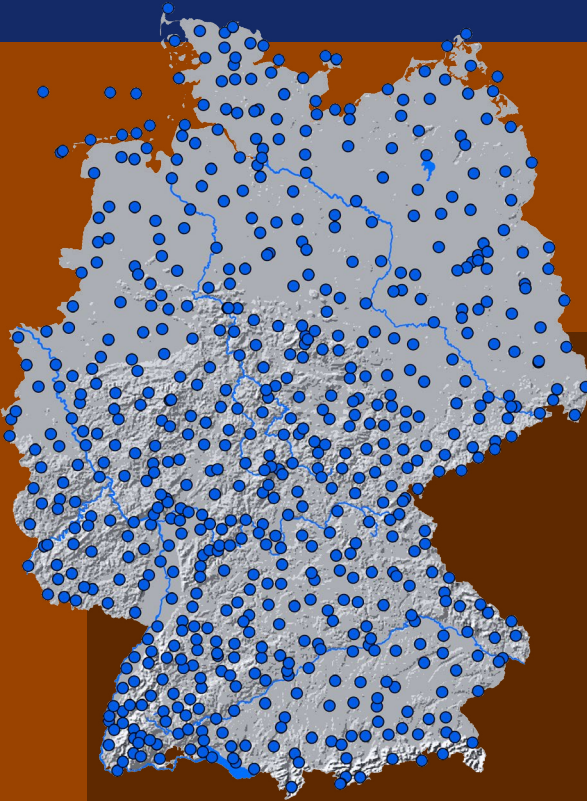
Die aus den Rasterfeldern abgeleiteten Zeitreihen der Gebietsmittel bieten die Möglichkeit, klimatologische Trends weitgehend unabhängig von den Inhomogenitäten einzelner Stationen darzustellen. Dabei ergibt sich für den Zeitraum von 1881 bis 2021 insgesamt eine Erwärmung von etwa 1,6 K (linearer Trend). Dabei ist insbesondere für die zurückliegenden Jahrzehnte eine Verstärkung des Trends feststellbar und das Jahrzehnt von 2011 bis 2020 lag bereits um 2 °C über den ersten 30 Jahren des Auswertungszeitraums (1881-1910).

Damit verläuft der Temperaturanstieg in Deutschland konsistent zum globalen Trend, wobei die Erwärmung aber stärker ausfällt als im weltweiten Mittel.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Die Messreihen stehen gemäß den Regelungen des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst (§ 6) und der Geodatennutzungsverordnung (Geo-NutzV) als offener Datenbestand zur Verfügung.



▲ Abb. 2.1-2: DWD-Stationen mit Temperaturmessungen (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Messnetz von Wetter- und Klimastationen mit Temperaturmessungen von gegenwärtig rund 500 Messstellen. Ein flächendeckendes Messnetz reicht bis ca. 1951 zurück. An allen Stationen mit Temperaturmessungen wird auch Feuchte gemessen.

Neben den DWD-Stationen gibt es weitere Temperaturmessungen von anderen Institutionen und Einzelpersonen, die aber nur zu einem geringen Teil in die Datenbank des DWD einfließen, weil sie

Internationale Einbettung

Von rund 180 Stationen werden routinemäßig synoptische Meldungen weltweit verbreitet. Von einer Auswahl dieser Stationen werden auch monatliche klimatologische Infor-

oft die Anforderungen an Repräsentanz, Messprogramm und Dauerhaftigkeit des Betriebs nicht erfüllen.

Vor 1950 werden die Stationen weniger, und es liegen teilweise nur noch Monatswerte vor, die bis zum Zweiten Weltkrieg digitalisiert wurden, während die Tageswerte teilweise verloren gingen. Für die Monatswerte liegt ein recht dichtes Netz von über 130 Stationen bis 1881 zurück vor, sodass daraus Rasterfelder interpoliert und Gebietsmittelwerte abgeleitet werden können (Kaspar et al. 2013). Davor gibt es nur noch einzelne Messreihen, die auch häufig aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme inhomogen sind. Die längste dieser Reihen (Berlin) reicht bis 1719 zurück.

Ein erstes einheitliches und gut dokumentiertes Messnetz wurde 1781 im Rahmen der Societas Meteorologica Palatina vom Kurfürst von der Pfalz eingerichtet. Es ging zwar nach rund zehn Jahren in den Wirren der französischen Revolution und ihrer Folgekriege wieder unter, einzelne Reihen konnten aber fortgeführt werden. So besteht auf dem Hohen Peißenberg bei Weilheim am Alpenrand eine

mationen in Form von CLIMAT-Meldungen bereitgestellt. Die Stationen Frankfurt, Hamburg, Hohenpeißenberg und Lindenberg sind Teil des GCOS Surface Network.

durchgehende Messreihe seit 1781, die auch weitgehend homogenisiert werden konnte.

Zwischen 1995 und 2005 wurde das Messnetz im Rahmen der allgemeinen Automatisierung der Messnetze weitgehend von konventionell abzulesenden Quecksilberthermometern und Registriergeräten auf Bimetallbasis auf elektrische Thermometer umgestellt. Durch Parallelmessungen an den Klimareferenzstationen konnte gezeigt werden, dass diese Umstellung zu keinen relevanten Inhomogenitäten in den Zeitreihen der Temperatur geführt hat (Kaspar et al. 2016).

Für derartige Vergleiche verschiedener Generationen der Messtechnik betreibt der DWD derzeit 10 Referenzstationen in verschiedenen klimatischen Regionen Deutschlands, an denen bereits lange Messreihen vorlagen (Hannak und Brinckmann 2020). Insbesondere wurden dort über einen Zeitraum von 10 Jahren die konventionellen analogen Messungen parallel zu den digitalen Messungen der automatisierten Systeme durchgeführt.

Weltweit sammeln mehrere Datenzentren die internationalen Temperaturdaten und werten diese unabhängig voneinander aus. Die unabhängigen Auswertungen bestätigen einheitlich den weltweiten Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte. Die Auswertungen fließen in die Berichte internationaler Organisationen ein, insbesondere in die jährlichen Statusberichte der WMO sowie in die Sachstandsberichte des IPCC.

Ressourcenbedarf

Innerhalb des gesetzlichen Auftrags des Deutschen Wetterdienstes ist der Betrieb der bestehenden Messstationen im Wesentlichen als gesichert anzusehen. Um Vorgaben zur Ressourceneinsparung umzusetzen, wurde durch den DWD eine Optimierung und Automatisierung seines Messnetzes vorgenommen. An ausgewählten Klimareferenzstationen wird die Fortführung langfristiger Reihen sichergestellt und die Vergleichbarkeit der Messtechnik untersucht.

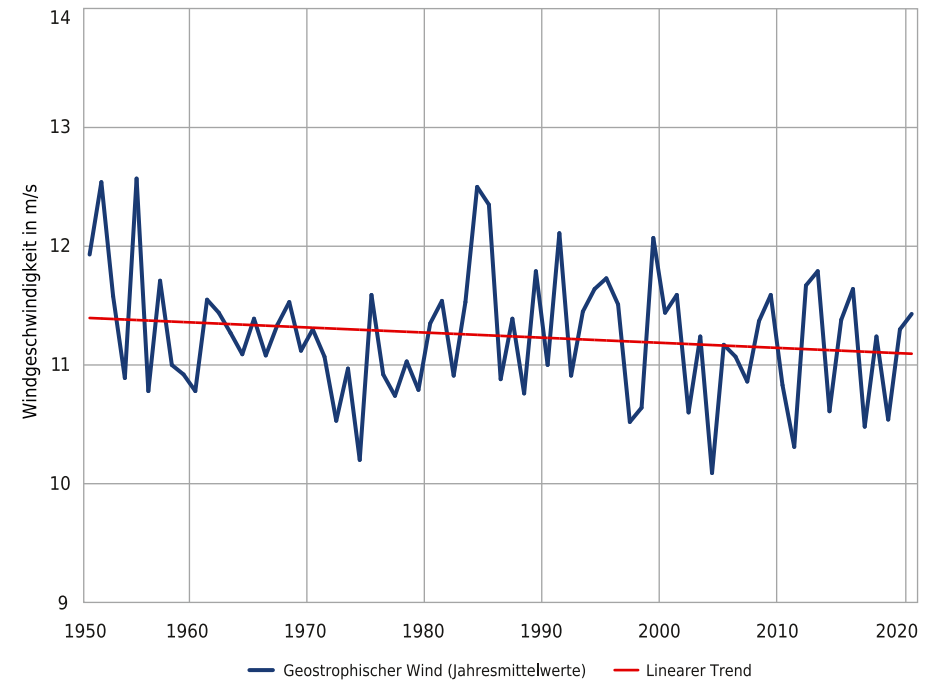
Um den historischen Datenbestand weiter für die Nutzung zu erschließen und zusätzliche lange Zeitreihen verfügbar zu machen, müssen laufende Digitalisierungsaktivitäten (Kaspar et al. 2015) fortgesetzt werden.

2.2 Wind

Der Wind stellt eine wesentliche Klimavariablen mit hoher Relevanz für verschiedene Anwendungsgebiete dar. Er ist insbesondere auch im Kontext der Nutzung erneuerbarer Energien von hoher Bedeutung, aber auch aufgrund des Schadenspotenzials bei extremen Sturmereignissen.



Jahresmittelwerte des geostrophischen Windes für die Deutsche Bucht

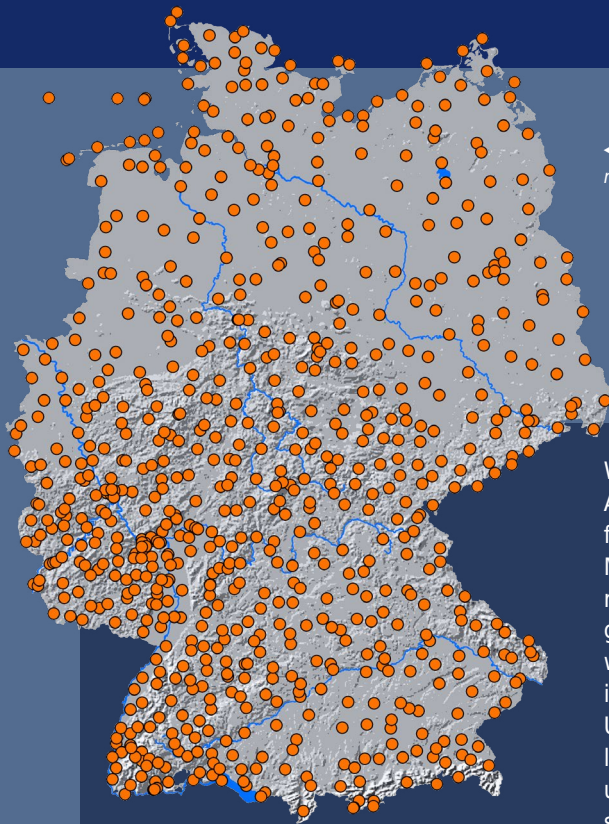


▲ Abb. 2.2-1: Jahresmittel des geostrophischen Windes, berechnet aus den bodennahen Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List. Dargestellt ist der Zeitraum von 1950 bis 2020. Die rote Linie zeigt den linearen Trend. (Quelle: DWD)

Klimasignale

Es finden sich keine klaren Trends in den Stationszeitreihen für die Windgeschwindigkeit. Längere Zeitreihen, die aus Luftdruckmessreihen abgeleitet wurden, zeigen ebenfalls keine signifikanten Trends. Es zeigt sich aber für Deutschland eine Abfolge von wind-

schwächeren und -stärkeren Zeiträumen. Eine windschwächere Phase gab es im Bereich der Deutschen Bucht in den 60er- und 70er-Jahren, während in den 80er- und 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts die Windgeschwindigkeit wieder etwas zugenommen hat.



◀ Abb. 2.2-2: Karte der DWD-Stationen mit Windmessungen (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt ein Messnetz von Wetter- und Klimastationen mit Windmessungen von gegenwärtig rund 300 Messstellen, die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in einer typischen Messhöhe von ca. 10 Metern erfassen. Dieses dichte Messnetz reicht mehrere Jahrzehnte zurück. Davor wird das Messnetz mit Windmessungen allmählich dünner. Von nebenamtlichen Stationen liegen aber vielfach Windschätzungen vor. Vor 1950 gibt es nur noch einzelne Messreihen. Zeitreihen von Windschätzungen gehen teilweise bis ins 19. Jahrhundert zurück.

Wegen der unterschiedlichen Mess- und Auswerteverfahren und des starken Einflusses von Umgebungsbedingungen und Messhöhe enthalten die längeren Zeitreihen teilweise beträchtliche Inhomogenitäten, die teilweise aber korrigiert werden können. Aktuelle Veränderungen in der Messtechnik, insbesondere die Umstellung des Messprinzips von Schalenkreuz- auf Ultraschallanemometer, untersucht der DWD an Klimareferenzstationen.

Für Anwendungen insbesondere im Bereich der Windenergie sind Messungen in größeren Höhen sowie im Offshore-Bereich von Interesse. Für die typischen Höhen moderner Windkraftanlagen liegen im Vergleich zu den bodennahen Messungen deutlich weniger Messungen der Windverhältnisse vor. Längerfristige Messungen an Messmasten in Höhen von 100 Metern und darüber liegen an einzelnen Standorten vor. Diese Messungen werden durch unterschiedliche Betreiber durchgeführt, u. a. am Meteorologischen Observatorium Lindenberg. Windmes-

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den

sungen erfolgen als ergänzende meteorologische Messung auch an den Messmasten, die im Rahmen des Integrated Carbon Observing System (ICOS) an derzeit insgesamt acht Standorten in Deutschland betrieben werden. Im Bereich der Nord- und Ostsee werden Windmessungen an den Masten der drei Forschungsplattformen (FINO1, -2, -3) durchgeführt. Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit in anwendungsrelevanten Höhen (> 100 m) sowie der eingeschränkten Homogenität der Windmessungen kommen in vielen Anwendungen indirekt abgeleitete Datensätze aus modellbasierten globalen oder regionalen atmosphärischen Reanalysen zum Einsatz (Kaspar et al. 2020). Die verfügbaren Windmessungen werden dabei zur Qualitätsbewertung der Datensätze verwendet und die Produktion der Datensätze profitiert von allen Beobachtungen, die in der Datenassimilation der eingesetzten numerischen Wettermodelle genutzt werden.

Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Die Messreihen an den Stationen des Deutschen Wetterdienstes stehen gemäß den Regelungen des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst (§ 6) und der Geodatennutzungsverordnung (GeoNutZV) als offener Datenbestand zur Verfügung.

Internationale Einbettung

Von den rund 180 synoptischen Stationen werden Winddaten routinemäßig durch synoptische Meldungen weltweit verbreitet. Von einer Auswahl dieser Stationen werden auch monatliche klimatologische Informationen in Form von CLIMAT-Meldungen bereitgestellt. Die Stationen Frankfurt, Hamburg, Hohenpeißenberg und Lindenberg sind Teil des GCOS Surface Network.

Ressourcenbedarf

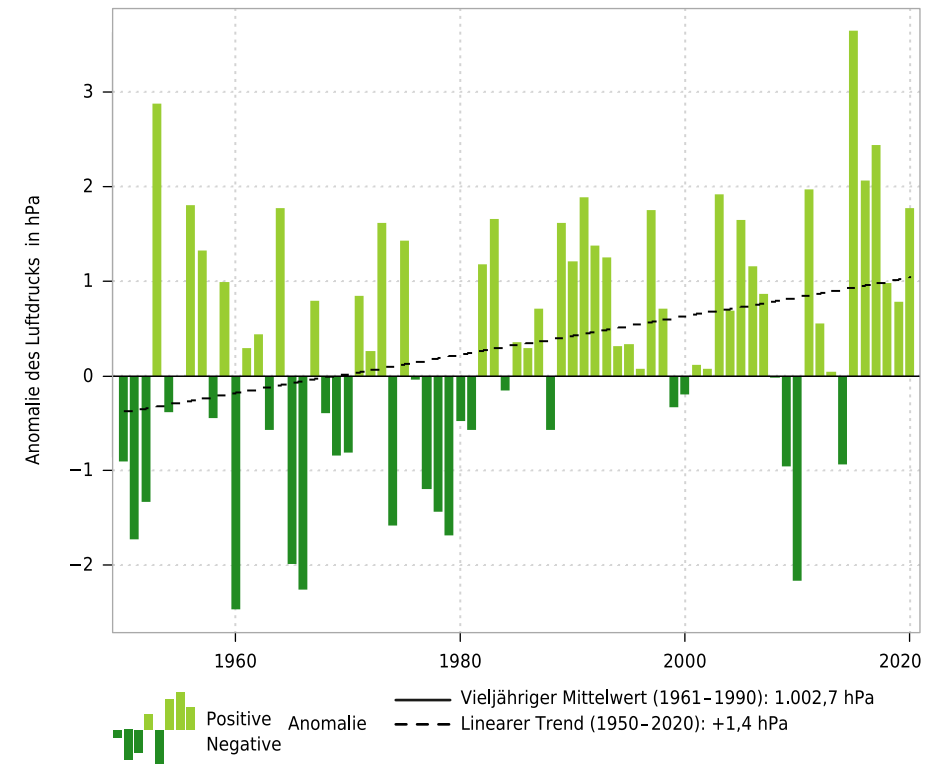
Der Betrieb der bestehenden DWD-Messstationen ist im Wesentlichen als gesichert anzusehen.

2.3 Luftdruck

Der Luftdruck stellt einen der Hauptindikatoren zur Beschreibung des Klimas dar, da seine Verteilung die allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre bestimmt. Er ist die Variable, die die wetterbestimmenden Hoch- und Tiefdruckgebiete charakterisiert.



Jährliche Luftdruckanomalie der Station Frankfurt am Main im Zeitraum 1950-2020

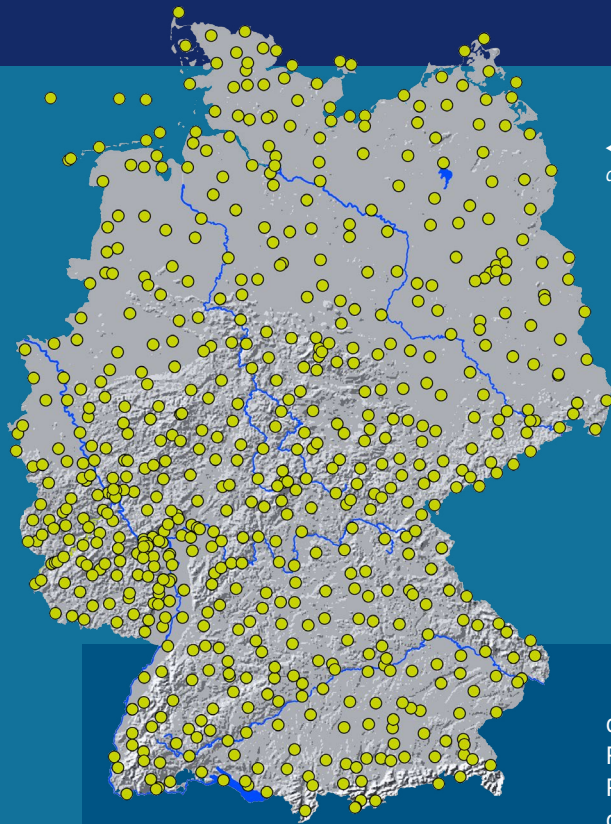


▲ Abb. 2.3-1: Dargestellt sind in Dunkelgrün die negativen und in Hellgrün die positiven Luftdruckabweichungen vom langjährigen Mittelwert 1961-1990. (Quelle: DWD)

Klimasignale

Trends in den deutschen Luftdruckwerten werden im Rahmen der Klimaüberwachung nicht flächendeckend systematisch ausgewertet. In den letzten drei Jahrzehnten wurden relativ hohe Luftdruckwerte registriert (siehe Abbildung 2.3-1 am Beispiel der Station Frankfurt).

Luftdruckänderungen äußern sich oft durch eine geänderte Häufigkeit und Ausprägung von Großwetterlagen. Beispielsweise sind trockene Zeitintervalle meist mit hohem Luftdruck verbunden, niederschlagsreiche dagegen mit vermehrter Tiefdrucktätigkeit. So kann ein Trend der Klimavariablen Luftdruck Änderungen anderer Klimavariablen begründen, wenn auch nicht ursächlich erklären.



◀ Abb. 2.3-2: Orte, an denen in Deutschland der Luftdruck gemessen wird (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Da der Luftdruck räumlich normalerweise recht homogen ist, muss das Messnetz nicht ganz so dicht sein wie bei den anderen klimatischen Messgrößen. Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Messnetz von Wetter- und Klimastationen mit Luftdruckmessungen von gegenwärtig rund 180 Messstellen. Dieses Messnetz reicht etwa 70 Jahre zurück.

Vor 1950 werden die Stationen weniger. Vor etwa 1930 gibt es nur noch einzelne Messreihen, die auch häufig aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme inhomogen sind.

Ein erstes einheitliches und gut dokumentiertes Messnetz wurde 1781 im Rahmen der Societas Meteorologica Palatina vom Kurfürst von der Pfalz eingerichtet. Es ging zwar nach rund 10 Jahren in den Wirren der französischen Revolution und ihrer Folgekriege wieder unter, einzelne Reihen konnten aber fortgeführt werden. So besteht auf dem Hohen Peißenberg bei Weilheim am Alpenrand eine durchgehende Messreihe seit 1781.

Zwischen 1995 und 2005 wurde das Messnetz im Rahmen der allgemeinen Automatisierung der Messnetze weitgehend von manuell bedienbaren Quecksilberbarometern und analog registrierenden Dosenbarometern auf digital registrierende Geräte umgestellt. Wesentliche Inhomogenitäten in den Zeitreihen konnten aber nicht festgestellt werden.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Internationale Einbettung

Von 180 Stationen werden routinemäßig synoptische Meldungen weltweit verbreitet. Von einer Auswahl dieser Stationen werden auch monatliche klimatologische Informationen in Form von CLIMAT-Meldungen bereitgestellt. Die Stationen Frankfurt, Hamburg, Hohenpeißenberg und Lindenberg sind Teil des GCOS Surface Network. Eine Sammlung internationaler Druckdaten liegt mit der International Surface Pressure Databank vor, von der in unregelmäßigen Abständen aktualisierte Versionen veröffentlicht werden.

Ressourcenbedarf

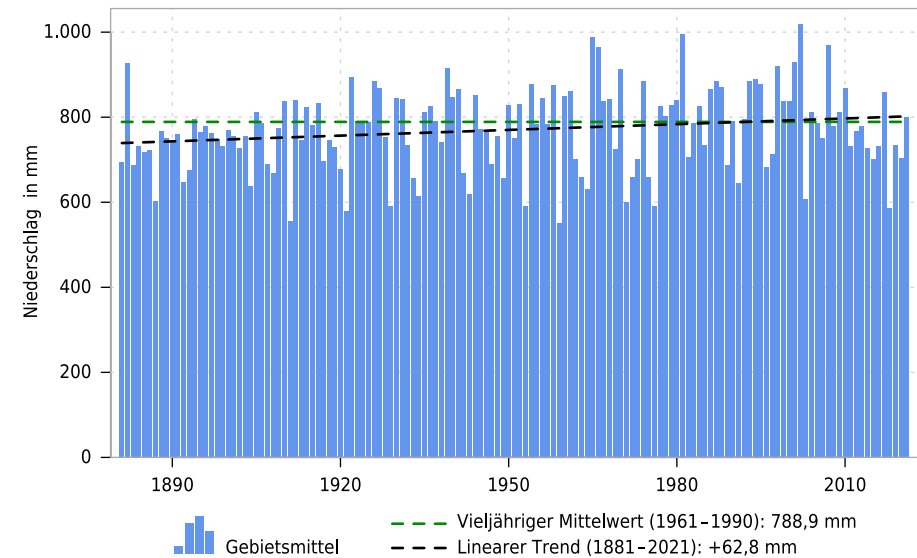
Innerhalb des gesetzlichen Auftrags des Deutschen Wetterdienstes ist der Betrieb der bestehenden Messstationen im Wesentlichen als gesichert anzusehen. Eine kontinuierliche Fortsetzung von Digitalisierungsaktivitäten ist erforderlich, um zusätzliche lange Zeitreihen für wissenschaftliche Auswertungen und als Grundlage für die Erstellung vieljähriger modellbasierter Reanalysen verfügbar zu machen.

2.4 Niederschlag

Der Niederschlag gehört mit der Temperatur zu den Hauptindikatoren zur Beschreibung des Klimas und seiner Veränderungen und ist gleichzeitig wichtiger hydrologischer Parameter für den Wasserkreislauf und -haushalt mit entsprechender Bedeutung für Wasser- und Landwirtschaft. Dank seines Klimadatenarchivs kann der Deutsche Wetterdienst bis ins Jahr 1881 zurück verlässliche langjährige Auswertungen zum räumlichen und zeitlichen Verhalten des Parameters auch im Kontext der anthropogenen Klimaänderungen vornehmen. Hierzu liegen in jüngerer Zeit neben einer wachsenden Anzahl von zeitlich hochauflösenden In-situ-Messungen auch fernerkundlich erhobene Niederschlagsdaten bereit.



Mittlere jährliche Niederschlagshöhe Deutschlands in den Jahren 1881-2021

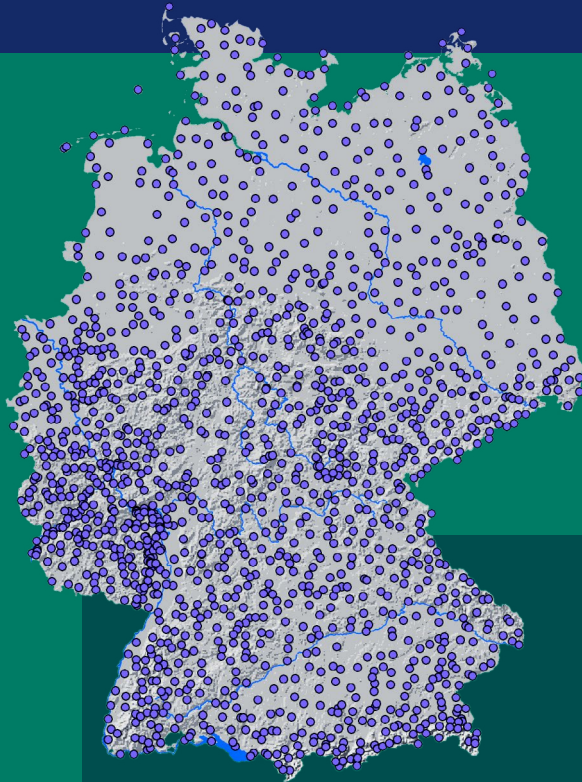


▲ Abb. 2.4-1: Die Zeitreihe der mittleren Niederschlagshöhe basiert auf einem Kollektiv von rund 400 deutschen Niederschlagsstationen. (Quelle: DWD)

Klimasignale

Die aus den Rasterfeldern der In-situ-Niederschlagsmessungen abgeleiteten Gebietsmittelzeitreihen bieten die Möglichkeit, ab 1881 klimatologische Trends weitgehend unabhängig von der Inhomogenität einzelner Stationen darzustellen (siehe Abb. 2.4-1). Im Jahresmittel ergibt sich eine Zunahme der Niederschlagsmenge in Deutschland über die letzten 140 Jahre von knapp 8 %, die in den westlichen und nordwestlichen (maritim geprägten) Teilen Deutschlands größer ist als in den östlichen und südlichen (kontinental geprägten). Sie konzentriert sich saisonal auf den Winter mit 26 %, ist im Frühling und Herbst mit etwa 7 % und 5 % auch

noch positiv, während im Sommer bereits eine Abnahme um 4 % zu erkennen ist. Im letzten Jahrzehnt wird eine Trendabschwächung infolge wiederholt auftretender Niederschlagsdefizite insbesondere im Frühling, zum Teil aber auch im Sommer und Herbst, beobachtet. In Verbindung mit den weiter angestiegenen Temperaturen gibt es eine zunehmende Tendenz zur Austrocknung in der warmen Jahreszeit von April bis in den Herbst hinein. Hinweise auf früheren Beginn und späteres Ende der Saison mit konvektiven Niederschlägen bei gleichzeitig stärkerer Ausprägung der Starkregenereignisse häufen sich.



▲ Abb. 2.4-2: Aktive Niederschlagsstationen im Archiv des DWD (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Messnetz von Wetter- und Klimastationen mit Niederschlagsmessungen von gegenwärtig rund 2.000 Messstellen (Karte oben), an denen zumindest Tagessummen erstellt werden. Seit etwa 1995 werden die Niederschlagsmessungen in zunehmendem Maße auf digitale Messsysteme umgestellt. Dadurch sind die Messungen zeitnah verfügbar geworden und liegen auch mit hoher zeitlicher Auflösung (bis in den Minutenbereich) vor (siehe violetten Bereich in Abb. 2.4-4).

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Über 1.000 dieser Stationen sind inzwischen automatisiert. An den konventionellen Stationen gab und gibt es meist nur eine tägliche Messung um 7 Uhr morgens. Lediglich an den rund 500 Klimastationen lagen bis zum Jahr 2000 immerhin drei tägliche Messungen um 7, 14 und 21 Uhr MOZ vor. Seitdem sind sukzessive bis heute alle Klimastationen automatisiert worden. Daneben gibt es einige hundert analoge Regenregistriergeräte, aus denen stündliche Niederschlagssummen abgelesen werden.

Das so betriebene dichte Tagesniederschlagsmessnetz reicht etwa 70 Jahre zurück und umfasste 1951–2004 (1969–2000) sogar über 3.000 (4.000) Stationen (vergleiche Abb. 2.4-2), welche allerdings größtenteils personell besetzt mit entsprechend hohem Aufwand betrieben werden mussten. Benötigt man nur Monatswerte, kann der DWD für die vergangenen 100 Jahre auf ein Netz von über 2.000 Stationen zurückgreifen und die 1.000er Marke wird sogar bis 1891,

Internationale Einbettung

Die Daten der Niederschlagsmessstationen werden u. a. an das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC, siehe eigenen Beitrag 5.1), das beim DWD angesiedelt ist, weitergeleitet. Darüber hinaus ist der Parameter Niederschlag einer der Essential Climate Variables, für die der DWD das Regio-

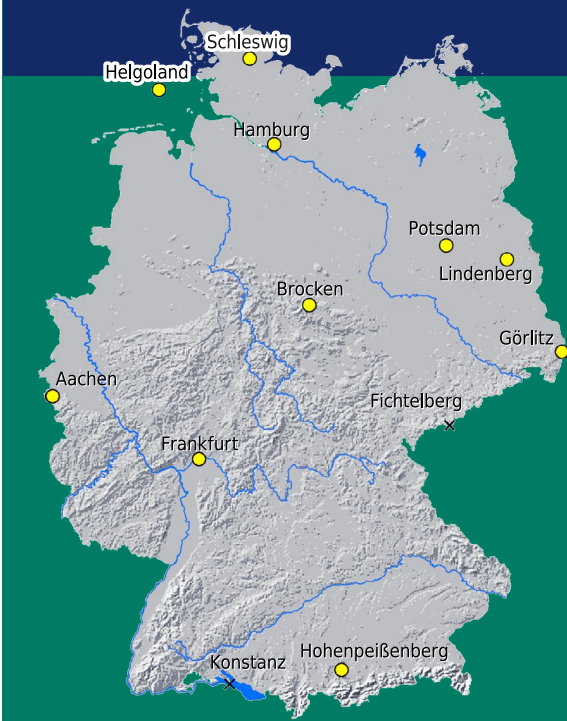
nale Klimaüberwachungszentrum der WMO RA VI (WMO RA VI RCC-CM) betreibt. Der DWD engagiert sich aktiv in internationalen Gremien und Arbeitsgruppen (z. B. WMO, Copernicus Services C3S, CAMS, CEMS und GEO) zwecks seiner adäquaten Positionierung im Bereich der europäischen und globalen Klimaüberwachung.

also über 130 Jahre lang, nicht unterschritten. Schaut man weitere 10 Jahre zurück, so liegt immer noch ein recht dichtes Netz von mehreren hundert Stationen bis 1881 zurück vor, sodass daraus immer noch verlässliche monatliche Rasterfelder interpoliert und Gebietsmittelwerte abgeleitet werden konnten. Davor gibt es nur noch einzelne Messreihen, die auch häufig aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme inhomogen sind.

Neben den DWD-Stationen gibt es weitere Niederschlagsmessungen von anderen Institutionen und Einzelpersonen, die aber nur zu einem geringen Teil in die Datenbank des DWD einfließen, weil sie die Anforderungen an Repräsentanz, Messprogramm und Dauerhaftigkeit des Betriebs nicht erfüllen oder der DWD nicht über sie verfügen kann.

Ressourcenbedarf

Der Betrieb der bestehenden Messstationen ist im Wesentlichen als gesichert anzusehen. Die Automatisierung wird jedoch weiter vorangetrieben werden müssen. Im Zuge dessen ist der personalintensive Betrieb weiter reduziert und schließlich auch an Flugplatz- und Klimareferenzstationen eingestellt worden. Niederschlagsüberwachung in Zeiten des Klimawandels muss hochverfügbar und hochauflösend sein, Deutschland und die angrenzenden relevanten Flusseinzugsgebiete umfassen und erfordert gleichzeitig den Weiterbetrieb von Referenzstationen mit essentiellen, das heißt langen Reihen. Um zusätzliche lange Zeitreihen für wissenschaftliche Auswertungen verfügbar zu machen, ist die kontinuierliche Fortsetzung der Digitalisierungsaktivitäten erforderlich. Darüber hinaus sind im Wetterradarverbund des DWD inzwischen zwei Dekaden an Niederschlagsdaten prozessiert worden.



▲ Abb. 2.4-3: Standorte der aktuell zehn Klimareferenzstationen des DWD. Konstanz und Fichtelberg gehören seit 2019 nicht mehr dazu. (Quelle: DWD)

Lange Reihen und ihre Bedeutung

In Deutschland sind die systematische stationsbasierte Erfassung des Niederschlages und der Betrieb der korrespondierenden Stationsnetze stark an die betreibenden Organisationen gekoppelt. Hier ergibt sich ein räumlich heterogenes Bild, wobei erst seit 1934 mit dem Reichswetterdienst ein nationaler Wetterdienst überhaupt existierte. Zuvor und bis zur Gründung des DWD waren regionale und Landeswetterdienste mit der Niederschlagsbeobachtung betraut, weshalb es entsprechend viele regionale Messnetze gab. Die längste durchgehende Reihe in Deutschland besitzt die Station Jena (Sternwarte) in Thüringen, die seit 1827 misst.

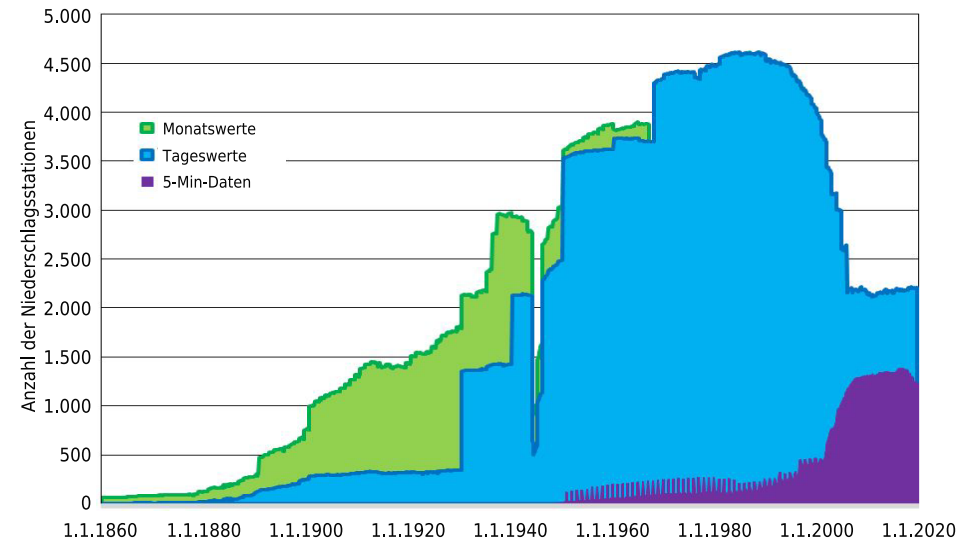
Klimareferenzstationen des DWD

Wegen der fortschreitenden Automatisierung der Wetterbeobachtung ist es notwendig, den Einfluss der Umstellung der Datenerhebung auf digitale Messverfahren auf die Datenreihen genau zu untersuchen und zu quantifizieren. Daher wird das Wetter an Klimareferenzstationen, parallel zu den digitalen Aufzeichnungen, durch gut ausgebildete Wetterbeobachter mit konventionellen Mess- und Beobachtungsverfahren erfasst. Die resultierenden mindestens zehnjährigen Vergleichsmessungen vermeiden Fehlinterpretationen der vom DWD gewonnenen Zeitreihen im Hinblick auf klimatologische Fragestellungen und insbesondere die Klimaveränderung. Mit dem System »Klimareferenzstation« übernimmt der DWD bereits eine Vorreiterrolle und ist Ansprechpartner für viele Wetterdienste im europäischen Ausland. Das Ziel ist der Aufbau eines europaweiten Netzes von Klimareferenzstationen. Die vom DWD ausgewählten Standorte (siehe Abb. 2.4-3) sind repräsentativ für ihr landschaftliches und klimatisches Umfeld (Hannak und Brinckmann 2020).

Projekte des DWD zur Rettung analoger historischer Daten

Seit Anfang 2005 betreibt der DWD das KLIDADIGI-Projekt, um historische Tagesniederschlagsdaten, vorhanden in Papierform, durch Digitalisierung für Zwecke der Klimaüberwachung und -forschung insbesondere auch in Anbetracht des Klimawandels, verfügbar zu machen und vor dem endgültigen Verfall zu retten. Dabei zeigt der grüne Bereich in Abb. 2.4-4 die Anzahl an Niederschlagsstationen mit Monatswerten, für die es auch noch

Zeitliche Belegung von Niederschlagsdaten mit Monats-, Tages- und Minutenaufösung



▲ Abb. 2.4-4: Zeitlicher Verlauf der Verfügbarkeit von Monats- (grün), Tages- (blau) und 5-Minutenwerten (violett) des Niederschlages aus Deutschland im Zeitraum von 1860 bis Ende 2019 (Quelle: DWD)

Tagesdaten zur Digitalisierung gibt. Die vorhandenen Papierunterlagen von insgesamt 165.000 Niederschlagsstationsjahren zuzüglich 23.000 Stationsjahren aus Klimastationen des DWD würden einen Arbeitsaufwand von etwa 790 Personenjahren erfordern. Bis Ende 2025 ist jedoch geplant, etwa 25 % der Unterlagen zu digitalisieren und zu retten (hauptsächlich lange und vollständige Reihen).

Im Rahmen der Analyse von Starkniederschlägen im Kurzzeitbereich werden, insbesondere seit 2018 mit Unterstützung durch das Projekt MUNSTAR, analoge Aufzeichnungen der Niederschlagsschreiber von ca. 250 Stationen gescannt, digital analysiert und daraus 5-Minutenwerte erzeugt. Die Datenreihen unterschiedlicher Länge beginnen in der Regel Mitte des 20. Jahrhunderts. Die

ältesten bisher gefundenen Registrierstreifen stammen jedoch aus dem Jahr 1903. Von den rund 250 Stationszeitreihen konnten bisher ca. 130 bis zum Zeitraum 2020 verlängert werden.

Weitere weltweite historische Niederschlagsaufzeichnungen von über 2.200 überseeischen Stationen der ehemaligen Deutschen Seewarte liegen in Hamburg vor. Die meist 12-stündigen Messungen (zwei pro Tag) stammen überwiegend aus den Zeiträumen von 1830 bis 1918 und 1930 bis 1943. Die Stationen verteilen sich über alle Kontinente mit Schwerpunkten in den ehemaligen deutschen Kolonien bzw. Schutzgebieten in Afrika, in China und im tropischen Pazifik/der Südsee. Bisher wurden 761 Stationen bearbeitet, was etwa 34 % des Archivs entspricht (Stand Juni 2021).

Neue Anforderungen durch die anthropogene Klimaänderung

Im Rahmen der Diskussion um die anthropogene Klimaerwärmung sind Bedeutung und Anforderungen an Qualität und raumzeitliche Auflösung der Überwachung von Variabilität und Trends des Niederschlages inklusive ihrer regionalen Ausprägungen weiter gestiegen. So stellt die Anpassung an sich ändernde hydrometeorologische Bedingungen eine der größten Herausforderungen an die Resilienz von Gesellschaften gegen die Auswirkungen des Klimawandels dar.

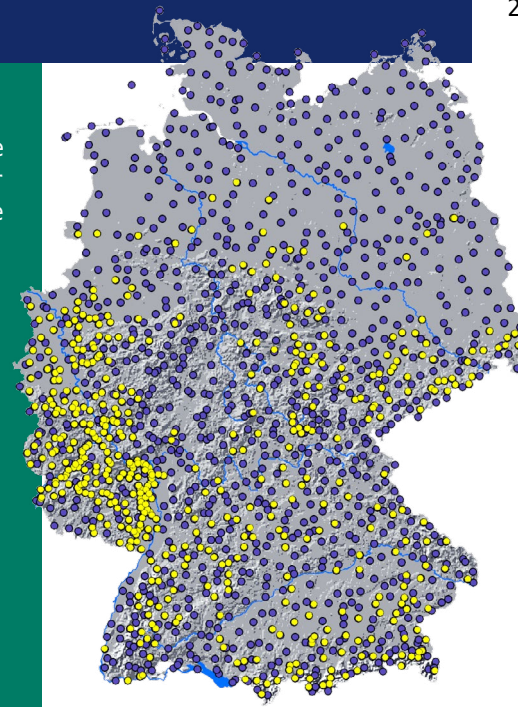
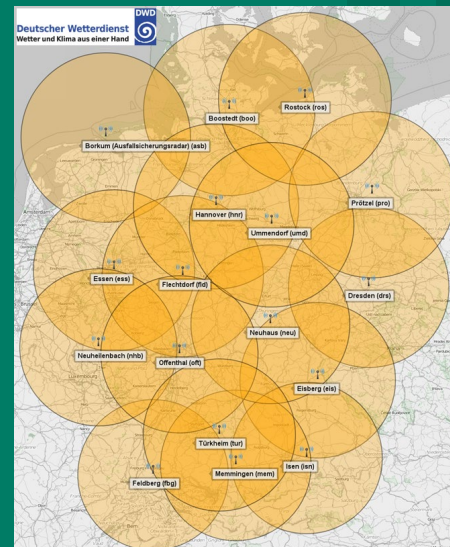
Stationsbasierte Niederschlagsdaten bilden dabei aufgrund Ihrer hohen Genauigkeit und der zeitlichen Länge der zahlreichen verfügbaren Beobachtungsreihen nach wie vor das Rückgrat der Niederschlagsüberwachung. Allerdings weisen Stationsdaten spezifische Probleme in Bezug auf Repräsentanz und Homogenität der Messungen auf. Darüber hinaus war selbst in den Jahren 1969–2000 das Stationsnetz von damals noch über 4.000 Messstellen bei weitem nicht ausreichend dicht, um extreme und kleinräumige Niederschlagsereignisse zu erfassen. Das Erfassungsproblem verschärft sich für schlecht zugängliche Regionen mit folglich reduzierter Stationsdichte. Dies liefert hinreichend Anhaltspunkte, satelliten- und radargestützte Niederschlagsmessungen auch für hydroklimatologische Anwendungen heranzuziehen, obwohl zumindest die radargestützten Messungen ursprünglich nur für Echtzeitanwendungen eingeführt wurden. Mittlerweile vorliegende dekadische national flächendeckende satelliten- und radargestützte Niederschlagsdaten mit raum-

zeitlichen Auflösungen bis zu einer Stunde und einem Kilometer bieten Potenzial zur hochauflösenden Niederschlagsreanalyse unter klimatologischen Aspekten (Mittel, Varianz, Extrema, Trends).

Radargestützte quantitative Niederschlagsüberwachung

RADOLAN, das DWD-Routineverfahren zur Online-Aneicherung von Radarniederschlagsdaten mithilfe automatischer Bodenniederschlagsstationen, liefert flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste quantitative Niederschlagsdaten im Echtzeitbetrieb für Deutschland. Die Datengrundlage für die Radar-Online-Aneicherung bildet einerseits der operationelle Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes mit inzwischen 17 Standorten, die mit C-Band-Dopplerradargeräten ausgerüstet sind

Abb. 2.4-5: C-Band-Radarverbund des DWD, Radarerfassung jeweils in 150-km-Radien (Quelle: DWD) ▼



▲ Abb. 2.4-6: Standorte der automatischen Ombrometer des DWD (lila) und der Partnermessnetze (gelb) im Mai 2021 (Quelle: DWD)

(Abb. 2.4-5), und andererseits das gemeinsame Niederschlagsmessnetz des DWD und der Bundesländer mit automatisch abrufbaren Ombrometern (Abb. 2.4-6). Radarseitig wird im Standardbetrieb der »Precipitation Scan« mit seinen fünfminütigen Radarniederschlagsdaten und einer maximalen Reichweite von 150 km Radius um den jeweiligen Standort für die quantitative Niederschlagsbestimmung genutzt. Von derzeit mehr als 1.000 Ombrometerstationen des DWD und inzwischen über 500 Stationen der Bundesländer wird der stündlich gemessene Niederschlagswert zur Aneicherung der Radar-

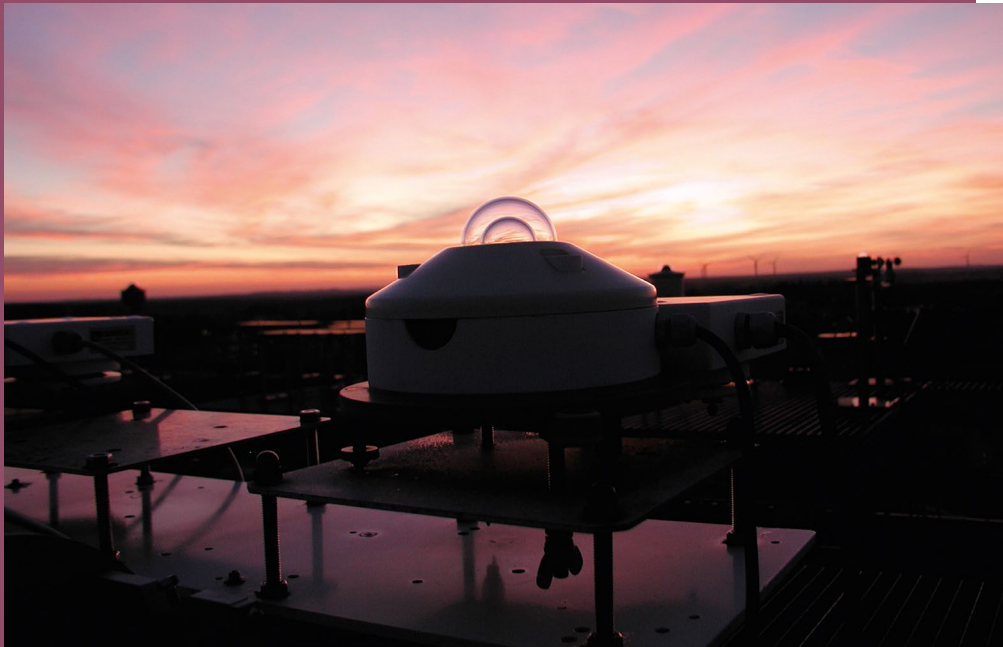
daten herangezogen. Das Verfahren arbeitet seit 2005 operationell, wobei auch nach der Einführung noch Verbesserungen in das RADOLAN-System eingepflegt wurden. Die Basis der benötigten Eingangsgdaten steht aber bereits seit Januar 2001 zur Verfügung, weshalb der DWD nochmal eine raumzeitlich hochauflösende quantitative Niederschlagsanalyse durchgehend seit dem 1. Januar 2001 erstellt hat. Diese hat den Grundstein für eine kontinuierlich fortgeschriebene radarbasierte Niederschlagsklimatologie und Kataloge aller Niederschlagsereignisse in Deutschland seit Anfang 2001 gelegt.

Messungen auf dem Meer

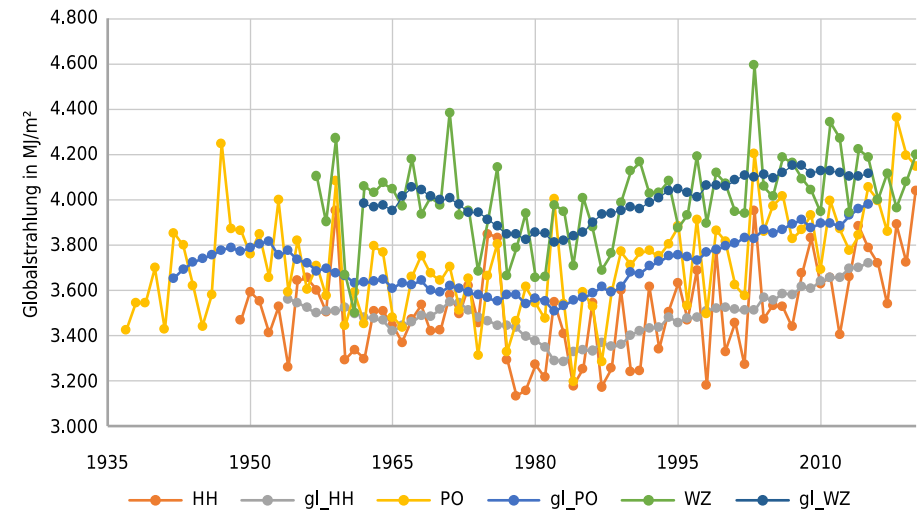
Obwohl der Wetterschlüssel für die Verbreitung von meteorologischen Messungen auf See das Element Niederschlag vorsieht, wird auf der Flotte der freiwillig beobachtenden Schiffe sowie auf Bojen und Feuerschiffersatzsystemen in Nord- und Ostsee kein Niederschlag erhoben, da die Messungen auf See sehr unzuverlässig sind. Die Messungen werden vor allem durch die Schiffs- bzw. Bojenbewegung in den Wellen, Gischt und Wind einfluss verfälscht. Von den deutschen Forschungsschiffen verfügen die POLARSTERN und die METEOR über Schiffs-Niederschlagsmesser. Aber auch deren Daten sind fehlerbehaftet und lückenhaft und können nicht für klimatologische Auswertungen herangezogen werden.

2.5 Strahlung

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche ist eine zentrale Größe für den Energiehaushalt des Systems Erde-Atmosphäre. Räumliche und zeitliche Unterschiede in der Strahlungsbilanz generieren Wetter und Klima. Die am häufigsten gemessene Globalstrahlung als eine ihrer Komponenten charakterisiert die von der Sonne bereitgestellte Energie. Die reflektierte Sonnenstrahlung sowie die von der Erdoberfläche und der Atmosphäre emittierte Wärmestrahlung modifizieren die verfügbare Energie. Die Wärmestrahlung steht mit dem Treibhauseffekt in Beziehung und ist eine wichtige Größe zu dessen Überwachung geworden.



Jahressummen der Globalstrahlung sowie deren 11-jährige gleitende Mittel



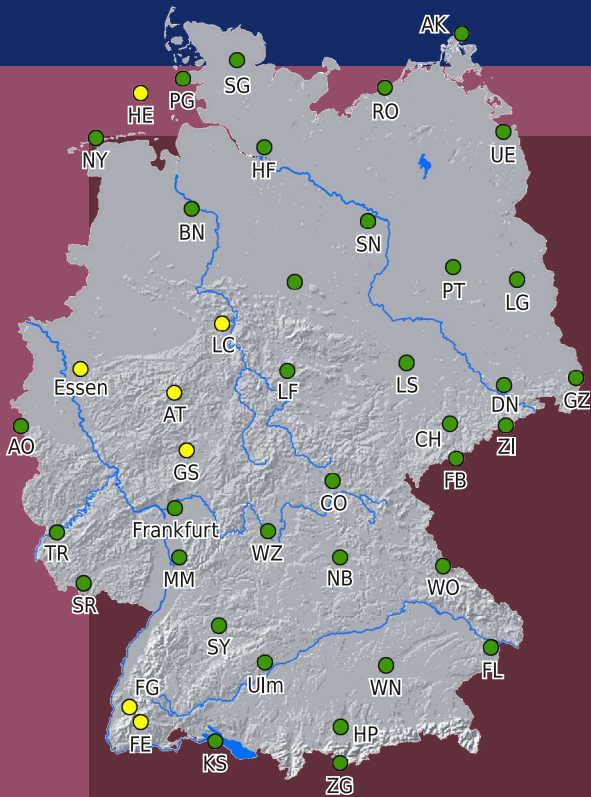
▲ Abb. 2.5-1: Jahressummen der Globalstrahlung sowie deren 11-jährige gleitende Mittel (gl) der Stationen Hamburg (HH: 1949–2020), Potsdam (PO: 1937–2020) und Würzburg (WZ: 1957–2020) (Quelle: DWD)

◀ Foto 2.5-1: Pyranometer zur Messung der Globalstrahlung am MOL-RAO

Klimasignale

Erst die kontinuierliche und präzise Messung der Strahlungsflüsse und weiterer atmosphärischer Größen über längere Zeiträume erlaubt Rückschlüsse auf Klimaveränderungen. An neun Stationen liegen Messreihen der Globalstrahlung von 50 und mehr Jahren vor. In deren Jahressummen sind deutlich regionale Unterschiede sichtbar, aber auch die generelle Abnahme beginnend in den 1950er-Jahren. Dieses Phänomen, welches durch die anthropogen bedingte Zunahme der Lufttrübung ausgelöst wurde, trat in vielen Regionen der Welt auf und wird deshalb als »global dimming« bezeichnet. Mit Abnahme der Lufttrübung ab Mitte der

1980er aufgrund der Luftreinhaltemaßnahmen folgte eine Zunahme der Globalstrahlung (»global brightening«), welche bis in die Gegenwart anhält. In der Tat wurden die höchsten Werte der Globalstrahlung in den vergangenen Jahren registriert. Allerdings sind diese höheren Werte kaum mehr durch eine weitere Abnahme der Lufttrübung erklärbar, da diese seit zwanzig Jahren auf tiefem Niveau verharret, sondern wohl vielmehr durch Veränderungen in der Bewölkung. Die Beobachtung solcher Änderungen wird in den nächsten Jahren zentral sein, da Klimamodelle die Wolkenveränderungen eventuell unterschätzen.



▲ Abb. 2.5-2: Strahlungsmessungen im Bodenmessnetz des DWD ab 2024. Stationen in Grün sind bereits in Betrieb. (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Die kontinuierliche, flächendeckende Registrierung der kurzwelligen Globalstrahlung und langwelligen Wärmestrahlung der Atmosphäre erfolgt gegenwärtig im Bodenmessnetz des Deutschen Wetterdienstes mit Pyranometern an 35 Stationen. Zusätzlich wird die diffuse Sonnenstrahlung mit einem Pyranometer in Kombination mit einem Schattenring gemessen. An 25 von diesen Stationen wird ebenfalls die Wärmestrahlung der Atmosphäre mit Pyrgeometern erfasst.

Die Daten werden als »Einminutenmittel« in der Datenbank gespeichert sowie einer automatischen und visuellen Datenprüfung unterzogen und über das Climate Data Center der Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung gestellt.

Langzeitreihen der kurzwelligen Rückstrahlung und der langwelligen Wärmestrahlung des Erdbodens stehen zur Zeit nur am Meteorologischen Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium (MOL-RAO) zur Verfügung. Diese werden dort kontinuierlich im 24-stündigen operationellen Betrieb registriert.

Die ersten quasi ununterbrochenen Registrierungen der Globalstrahlung erfolgen seit 1937 am früheren Meteorologischen Observatorium Potsdam. Im weiteren Verlauf etablierte sich in Deutschland ein Netz zur Messung der Globalstrahlung von 10 Stationen, welches im Laufe der Zeit weiter ausgebaut wurde. Zusätzlich werden seit Oktober 1994 am MOL-RAO im Rahmen des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) die einfallenden kurz- und langwelligen Strahlungsgrößen zeitlich hoch aufgelöst mit geringer Messunsicherheit ($\leq 2\%$) erfasst. Die BSRN-Messungen werden mit spektralen und spektroskopischen Messungen im UV- und sichtbaren Wellenlängenbereich ergänzt. Zudem werden am MOL-RAO mit einem speziellen Radiosondensystem regelmäßig vertikale Profile der einfallenden und ausgehenden kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse bis in die Stratosphäre erfasst. Diese Messungen sind weltweit einmalig.

Die weltweite Vergleichbarkeit der in Deutschland gewonnenen Strahlungsdaten wird durch die Kalibrierung der Messgeräte am Nationalen Strahlungszentrum am MOL-RAO gesichert.

Die räumliche Verdichtung aller Komponenten der Strahlungsbilanz sowie von zahlreichen Wolkenparametern wird seit geraumer Zeit durch die intensive Nutzung und Aufbereitung von Satellitendaten im Rahmen des CM SAF ermöglicht. Im neuen Konzept für die Strahlungsmessungen im Bodenmessnetz des DWD, welches sich gegenwärtig in der Umsetzungsphase befindet, nehmen die Satellitendaten dann auch eine zentrale Stellung ein. So wird die räumliche Verteilung der Globalstrahlung mittels Messungen von Satelliten erfasst. Die 42 Bodenstationen, an welchen die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse mit qualitativ sehr guter Sensorik gemessen werden, dienen dabei als Ankerstationen zur Validierung der Satellitendaten und deren Verschmelzung mit den Bodendaten.

Weitere hochpräzise Langzeitmessungen der Strahlung werden von verschiedenen Universitäten und Einrichtungen durchgeführt wie z. B. vom Jülich Observatorium für Wolkenentwicklung, vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) oder vom AWI. Das UV-Messnetz in Deutschland wird durch das Bundesamt für Strahlenschutz koordiniert und betreut.



▲ Foto 2.5-2: Präzisionsmessungen der einfallenden Strahlungsflüsse an der BSRN-Station Lindenberg

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass insbesondere die langen Zeitreihen relevanter meteorologischer Größen der Klimareferenzstationen komplexe klimatologische Analysen ermöglichen.

Internationale Einbettung

Wichtige Impulse hinsichtlich der globalen Zusammenarbeit auf dem Strahlungssektor gingen vom Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGJ) 1957/58 aus. Seit 1964 werden die im DWD-Netz gewonnenen Strahlungsdaten regelmäßig an das von der WMO eingerichtete World Radiation Data Centre (WRDC) am Geophysikalischen Hauptobservatorium in St. Petersburg geliefert.

Mit der DWD-Station Lindenberg sowie den vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) betriebenen Stationen Ny-Ålesund und Neumayer leistet Deutschland einen wichtigen Beitrag zum BSRN, das im

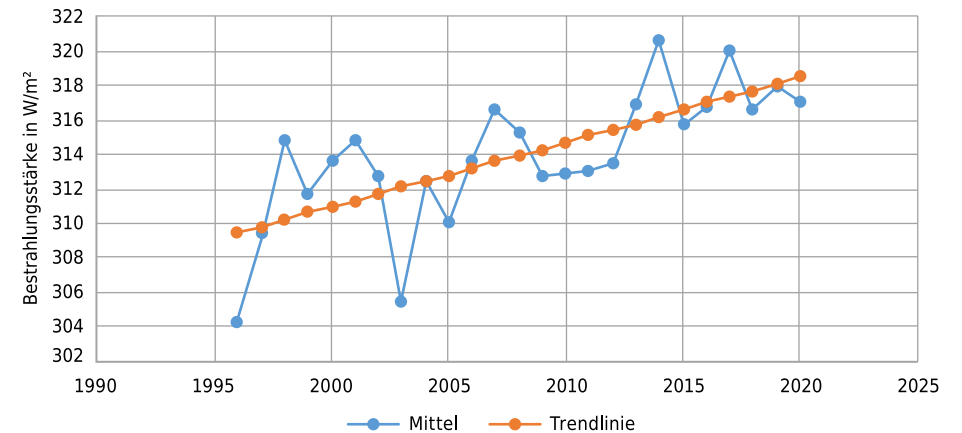
Rahmen des WCRP ins Leben gerufen wurde und nunmehr das GCOS-Strahlungsreferenznetzwerk ist. Diese Daten werden auch an das World Radiation Monitoring Center (WRMC) geliefert, das sich am AWI in Bremerhaven befindet (siehe Beitrag 5.3).

Auch die im Rahmen des CM SAF aus Satellitendaten abgeleiteten hochwertigen Strahlungsdatensätze haben große Bedeutung für die weitere Untersuchung und Verifizierung von Klimaänderungen, insbesondere durch ihre große Flächendeckung und der stetig wachsenden Verfügbarkeit unterschiedlicher Strahlungs- und Wolkenprodukte.

Foto 2.5-3: Blick auf das Gelände des MOL-RAO mit dem Regionalen Strahlungszentrum der WMO, Region VI, und der BSRN-Station im Vordergrund ▼



Jahresmittel der langwelligen Gegenstrahlung 1996–2020



▲ Abb. 2.5-3: Jahresmittel der langwelligen Gegenstrahlung (blau) mit Trendlinie (orange) an der BSRN-Station Lindenberg. Die Wärmestrahlung hat seit Messbeginn aufgrund der Temperatur- und Feuchtezunahme sowie des Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen um knapp 10 W/m² zugenommen. (Quelle: DWD)

Ressourcenbedarf

Auf der gemeinsamen Grundlage von Strahlungsdaten, die am Boden gemessen und auch aus Satellitendaten abgeleitet werden, können selbst kleine Langzeitänderungen in den Strahlungsflüssen quantifiziert werden und Schlussfolgerungen über die Ursachen von Klimaänderungen gewonnen werden, die als Grundlage für politische Entscheidungsträger dienen. Voraussetzung ist eine sehr geringe Messunsicherheit, die eine Detektion der meist geringen natürlichen Veränderungen zulässt.

Dazu bedarf es deshalb zwingend der Erhaltung von Referenzstationen

am Boden, die bereits über lange Messreihen komplexer Datensätze einschließlich Strahlungsmessungen verfügen. Diese müssen in Zukunft auch auf die Erfassung spektraler Strahlungsdaten ausgedehnt werden.

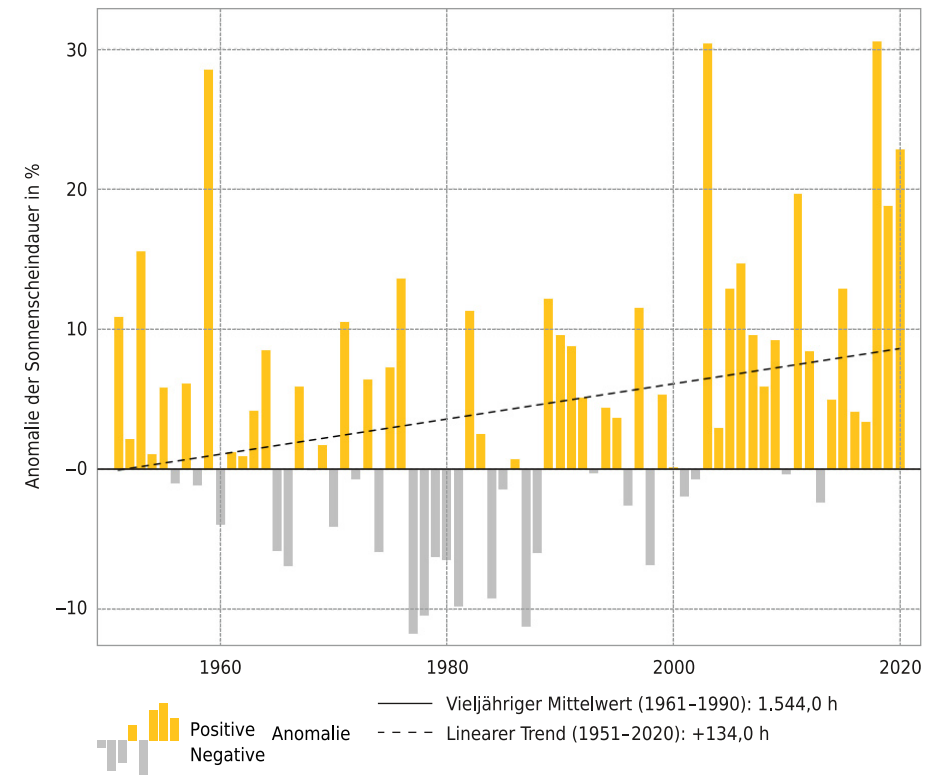
Weiterhin ist es notwendig, den gegenwärtigen Mangel an Kapazitäten zur fachgerechten Analyse sowohl der Satelliten- als auch der Bodendatensätze und ihrer Kombination zu beheben. Zu dieser Problematik zählt auch die unzureichende Grundfinanzierung an den Universitäten, welche eine nachhaltige Forschung kaum noch ermöglicht.

2.6 Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer stellt einen langjährig genutzten Hauptindikator der Klimaüberwachung dar und ist von besonderer Bedeutung für verschiedene Anwendungsgebiete. Insbesondere ist sie auch ein näherungsweise Indikator für die Strahlung, die im Rahmen der Nutzung regenerativer Energien von großer Bedeutung ist, für die aber nur wenige direkte Messreihen vorliegen, die mehrere Jahrzehnte abdecken. Inzwischen stellen auch Satellitendaten eine Alternative zur Ableitung von Strahlungs- und Sonnenscheindaten dar.



Jährliche Sonnenscheindauer Deutschland 1951-2020

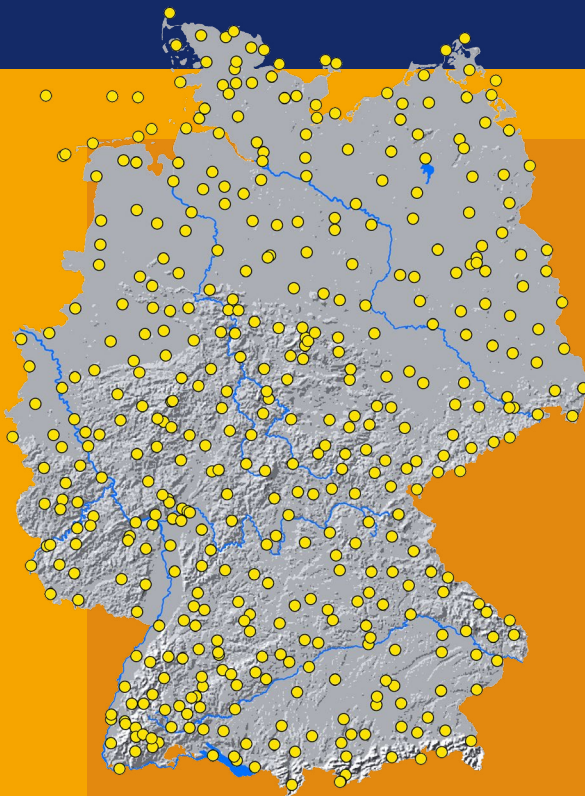


▲ Abb. 2.6-1: Jährliche Sonnenscheindauer Deutschland im Zeitraum 1951-2020 (Quelle: DWD)

Klimasignale

Aus dem dichten Messnetz konnten für den Zeitraum ab 1951 Rasterfelder interpoliert und daraus Gebietsmittelzeitreihen abgeleitet werden. Sie bieten die Möglichkeit, klimatologische Trends weitgehend unabhängig von den Inhomogenitäten einzelner Stationen darzu-

stellen. Dabei zeigen sich deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr und eine Zunahme der jährlichen Sonnenscheinstunden von 134 Stunden im Zeitraum von 1951 bis 2020 (linearer Trend).



▲ Abb. 2.6-2: Stationen, an denen der DWD die Sonnenscheindauer bestimmt (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Messnetz von Wetter- und Klimastationen mit Messungen der Sonnenscheindauer an gegenwärtig rund 270 Messstellen. Ein flächendeckendes Messnetz reicht bis ca. 1951 zurück.

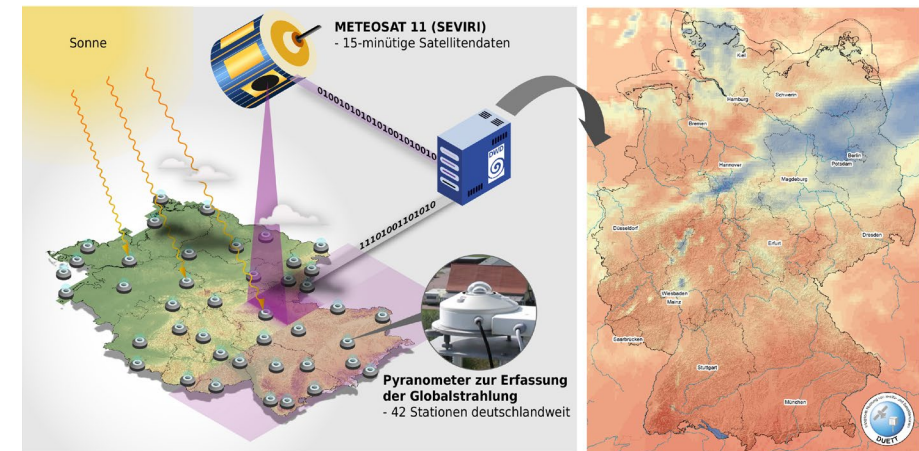
Davor gibt es nur noch einzelne Messreihen, die auch häufig aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme inhomogen sind.

Zwischen 1995 und 2005 wurde das Messnetz im Rahmen der allgemeinen Automatisierung der Messnetze weitge-

hend von Campbell-Stokes-Geräten auf der Basis des Brennglas-effekts auf automatisch registrierende Messgeräte umgestellt (SONie oder SCAPP). Während zuvor nur nach mühevoller visueller Analyse mit großer Zeitverzögerung stündliche Werte mit teilweise großer Unsicherheit aufgrund der subjektiven Auswertung gewonnen werden konnten, liegen die Daten der automatischen Messgeräte zeitnah und mit hoher zeitlicher Auflösung digital vor. Die Vergleichbarkeit der Messungen wurde durch Parallelmessungen an Klimareferenzstationen untersucht. Bedingt durch die unterschiedlichen Mess- und Auswerteverfahren ergaben sich teilweise beträchtliche Inhomogenitäten in den Zeitreihen (Hannak et al. 2019).

Inzwischen erfolgt eine Umstellung im Messnetz des DWD auf die Messung der Strahlung und es ist dabei vorgesehen, dass die Sonnenscheindauer aus diesen Strahlungsmessungen abgeleitet wird. Bei diesen Strahlungsmessungen handelt es sich um qualitativ hochwertige Messungen, deren Durchführung aber nur an einer reduzierten Anzahl von Stationen vorgesehen ist. Gleichzeitig werden derzeit Verfahren entwickelt, die durch die Kombination der Stationsbeobachtungen mit Satellitendaten eine Ableitung flächendeckender Sonnenscheindaten erlauben.

DUETT - Kombination von bodengebundenen Messdaten und Satellitendaten



▲ Abb. 2.6-3: Schematische Darstellung zur Kombination von bodengebundenen Messdaten und Satellitendaten im DWD-Projekt DUETT (Quelle: DWD)

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Die Messreihen der Sonnenscheindauer an den Stationen des Deutschen Wetterdienstes stehen gemäß den Regelungen des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst (§ 6) und der Geodatennutzungsverordnung (GeoNutzV) als offener Datenbestand zur Verfügung.

Internationale Einbettung

Von den rund 180 synoptischen Stationen werden Sonnenscheindaten routinemäßig durch synoptische Meldungen weltweit verbreitet. Von einer Auswahl dieser Stationen werden auch monatliche klimatologische Informationen in Form von CLIMAT-Meldungen bereitgestellt. Die Stationen Frankfurt, Hamburg, Hohenpeißenberg und Lindenberg sind Teil des GCOS Surface Network.

Ressourcenbedarf

Der Betrieb des DWD-Messnetzes ist im Wesentlichen als gesichert anzusehen.

2

Atmosphärische Beobachtungen



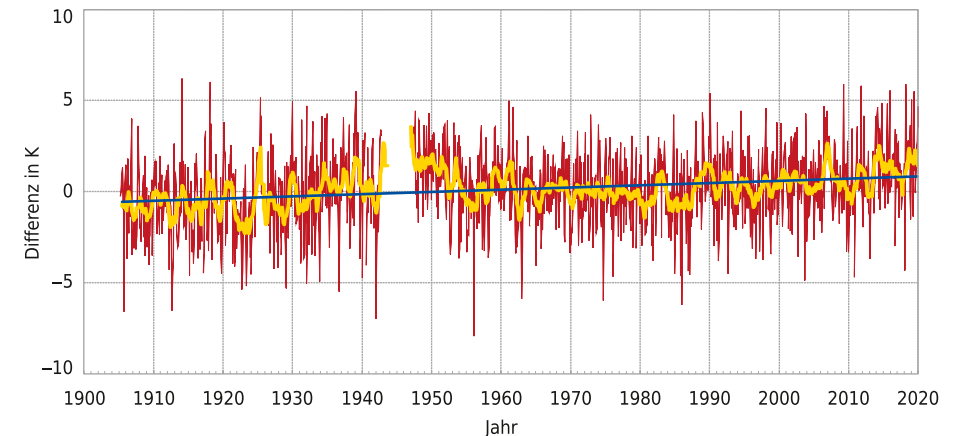
Freie Atmosphäre

2.7 Temperatur, Wind und Wasserdampf in der freien Atmosphäre

Der Teil der Atmosphäre, der für Wetter und Klima am Boden entscheidend ist, erstreckt sich bis zu einer Höhe von über 30 km. Über diesen Bereich variieren Temperatur, Wind, Wasserdampf und Druck sehr stark und ändern sich zum Teil auch über die Zeit sehr schnell. Vertikal über diesen Höhenbereich aufgelöste Messungen dieser Parameter sind sowohl für die kurzfristige Wettervorhersage als auch für die Entwicklung des langfristigen Klimas von essentieller Bedeutung.



Differenz der Lufttemperatur zum vieljährigen Mittel (1961–1990) bei 850 hPa



▲ Abb. 2.7-1: Zeitreihe der Abweichung der Lufttemperatur auf dem 850-hPa-Niveau vom vieljährigen Mittel 1961–1990 (rot: Monatswerte, gelb: gleitendes Mittel über 12 Monate, blau: linearer Trend) (Quelle: DWD)

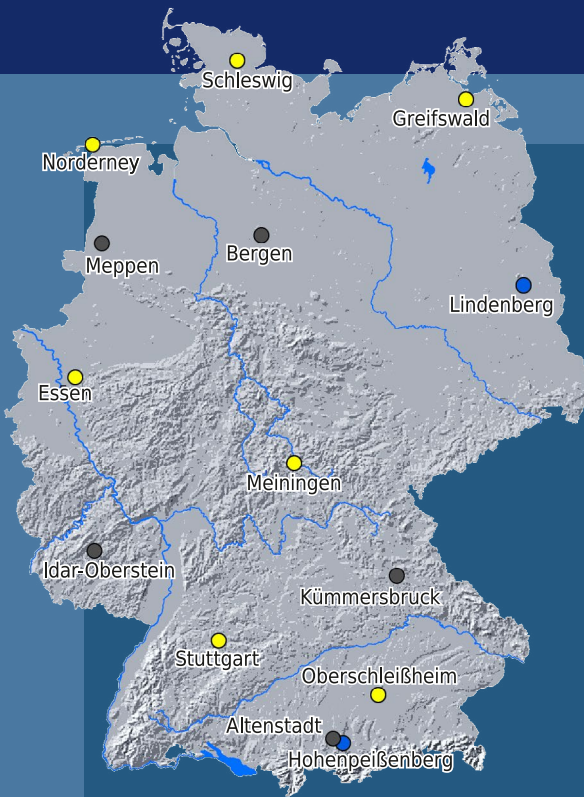
Klimasignale

Trends der Temperatur in der Troposphäre und vor allem in der Stratosphäre sind von großer Bedeutung für das Verständnis der Langzeitentwicklung der atmosphärischen Prozesse. In Abb. 2.7-1 ist die Temperaturzeitreihe für das Meteorologische Observatorium Lindenberg bei 850 hPa dargestellt; sie schließt auch Messungen durch Drachenaufstiege zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein. In der Troposphäre ist ein Temperaturanstieg um 0,1 K/10 Jahre zu erkennen. Die gelbe Kurve stellt das gleitende Mittel der Temperaturdifferenzen über 12 Monate dar. Messungen in der unteren Stratosphäre (bei 100 hPa) sind dagegen allein durch Radiosondenaufstiege bestimmt und zeigen eine deutliche Abkühlung in der Größenord-

nung von 0,5 K/10 Jahre. Erwähnenswert ist die Gegenläufigkeit des Temperaturtrends zwischen Troposphäre und Stratosphäre.

Historische Trends des troposphärischen Wasserdampfs sind mit großen Unsicherheiten behaftet und eine Aussage über die zeitliche Veränderung ist nur bedingt möglich. Mit Einrichtung von GUAN und vor allem GRUAN sowie durch die Verbesserung der Messtechnik sind zuverlässigere Aussagen zu Änderungen des troposphärischen Wasserdampfs zu erwarten. Langzeitrends von stratosphärischem Wasserdampf über mehrere Jahrzehnte wurden weltweit bisher nur an einer Station bestimmt. Spezialmessungen, die seit mehr als 10 Jahren an verschiedenen GRUAN-Stationen durchgeführt werden, bilden eine neue Stütze für Trends des stratosphärischen Wasserdampfs.

◀ Foto 2.7-1: Startvorbereitung für den Radiosondenaufstieg am MOL-RAO



◀ Abb. 2.7-2: Messungen mittels Radiosonden erfolgen an den DWD-Observatorien (blau), DWD-Radiosondenstationen (gelb) und Stationen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (dunkelgrau). (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Profile von Temperatur, Wind und Wasserdampf werden in Deutschland mittels Radiosonden an 14 Stationen gemessen. Neun dieser Stationen sind operationelle Radiosondenstationen des DWD, die anderen fünf werden in Kooperation von der Bundeswehr betrieben. Das Standardmessprogramm des DWD sieht zwei Radiosondenstarts pro Tag vor, lediglich am Meteorologischen Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium (MOL-RAO) werden operationell vier Sondierungen pro Tag gestartet. Bei besonderen Wetterlagen können auch andere Stationen ihr Sondierungsprogramm auf vier Radiosondenstarts pro Tag erhöhen.

Unter diesen Stationen ist das MOL-RAO die einzige Station des GCOS Upper-Air Network (GUAN) in Deutschland und zudem der Sitz des Lead Centre des GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN). Messungen innerhalb dieser Netzwerke streben größtmögliche Homogenität und Kontinuität an. Als Teil von GRUAN sind zudem die Rückführbarkeit auf internationale Standards sowie die vertikal aufgelöste Bestimmung der Messunsicherheit von großer Bedeutung.

Änderungen des stratosphärischen Wasserdampfs haben große Auswirkungen auf das Klima am Boden. Regelmäßige Messungen im Höhenbereich zwischen 10 km und 25 km finden ausschließlich am MOL-RAO statt.

Am MOL-RAO werden Vertikalprofile von Wasserdampf zudem mittels LIDAR bestimmt, was unter günstigen Wetterbedingungen zeitlich sehr hoch aufgelöste Daten zur Veränderung des atmosphärischen Wassergehalts in verschiedenen Höhenbereichen ergibt.

Vertikale Beobachtungen der Temperatur begannen in Lindenberg schon 1905, Feuchtemessungen der freien Atmosphäre jedoch haben erst seit etwa 20 Jahren eine Qualität, die ausreicht, um Langzeitänderungen des Wasserdampfs zu untersuchen.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4 Abs. 1 Nr. 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen. In diesem Zusammenhang unterstützt der DWD zahlreiche Messprogramme zu langfristigen Klimabeobachtungen, definiert Klimareferenzstationen und sorgt für die Kontinuität von langen Messreihen.

Ressourcenbedarf

Gegenwärtig sind weltweit Langzeit-Klimabeobachtungen durch Sparprogramme gefährdet. Klimareihen werden durch Unterbrechungen des Messprogramms beendet und benötigen daher kontinuierliche Ressourcenzuweisung. Dies betrifft vor allem die Beobachtungen der freien Atmosphäre

Internationale Einbettung

Die wissenschaftlichen Untersuchungen am MOL-RAO zu Temperatur und Wasserdampf der freien Atmosphäre finden in enger Kooperation mit der internationalen wissenschaftlichen Gemeinde statt. In der Messtechnik hat das MOL-RAO eine international anerkannt führende Rolle, was durch Projekte auch an anderen Stationen von GRUAN und GUAN verdeutlicht wird. Messungen werden zudem über verschiedene Datenzentren ausgetauscht und im wissenschaftlichen Verbund analysiert und ausgewertet. Diese Messungen sind die Grundlage bei der Beratung von Entscheidungsträgern in Politik und Verwaltung auf nationaler und internationaler Ebene.

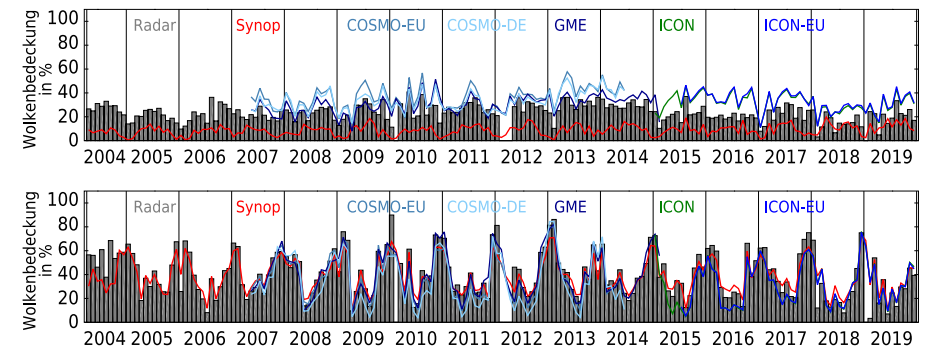
durch In-situ-Sondierungen, die nach wie vor die einzige Messtechnik für Klimareferenzdaten darstellen. Diese Messungen müssen unbedingt ohne Unterbrechung und mit ausreichender Überlappung bei Systemwechseln fortgeführt werden und benötigen dafür kontinuierlich Ressourcen.

2.8 Wolken

Wolken sind essentiell für den Energie- und Wasserhaushalt der Atmosphäre und haben deshalb einen erheblichen Einfluss auf Wetter und Klima. Klassische Augenbeobachtungen von Wolken sind an vielen Standorten zum Teil über mehr als 100 Jahre durchgeführt worden. Allerdings ließen sich weder kleinskalige räumliche Strukturen erfassen noch konnte auf mikrophysikalische Eigenschaften der Wolken geschlossen werden, weshalb satellitengestützte und bodengebundene Fernsondierungssysteme für die Wolkenbeobachtung immer wichtiger wurden und gegenwärtig Augenbeobachtungen bereits weitgehend ersetzt haben.



Mittlere monatliche Bedeckung mit hohen (Abb. oben) und tiefen Wolken (Abb. unten)



▲ Abb. 2.8-1: Die Zeitreihe ist abgeleitet aus Messungen des 35-GHz-Radars in Lindenberg im Vergleich zu Augenbeobachtungen (Synop) und den Simulationen der Wettervorhersagemodelle (COSMO-EU, COSMO-DE, GME, ICON, ICON-EU des DWD) für hohe Wolken (Wolkenbasis > 6 km, Abb. oben) und für tiefe Wolken (< 2 km, Abb. unten). (Quelle: DWD)

Gesetzliche Grundlagen

Im Gesetz über den Deutschen Wetterdienst sind im § 4 die Aufgaben genannt. Dazu zählen unter anderem:

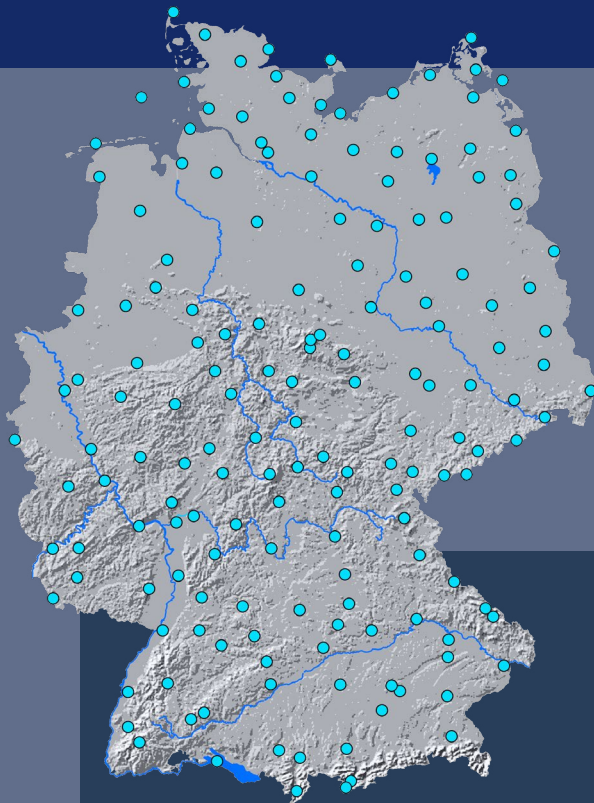
- die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre,
- der Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme zur Erfüllung der oben genannten Aufgaben und
- die Bereithaltung, Archivierung, Dokumentierung und Abgabe meteorologischer und klimatologischer Geodaten und Dienstleistungen.

Zur Erfüllung seiner Aufgaben betreibt der Deutsche Wetterdienst wissenschaftliche Forschung im Bereich der Meteorologie, Klimatologie und verwandter Wissenschaften und wirkt bei der Entwicklung entsprechender Standards und Normen mit.

Klimasignale

Erst die kontinuierliche Beobachtung über längere Zeiträume erlaubt Rückschlüsse auf Klimaveränderungen. Da diese Änderungen sehr gering ausfallen können, kommt der Homogenisierung der Reihen große Bedeutung zu, wobei Wechsel der Beobachtungsmethoden und Messinstrumente zu berücksichtigen sind.

Jahrelange Vergleiche von Augenbeobachtungen mit den aus Ceilometermessungen abgeleiteten Wolkenparametern erlauben es, konsistente Datensätze zu erzeugen. Zur Homogenisierung der aus Satellitenmessungen abgeleiteten Daten erfolgt im EUMETSAT CM SAF (Satellite Application Facility on Climate Monitoring) eine Reprozessierung der Produkte.



▲ Abb. 2.8-2: DWD-Stationsnetz mit Ceilometern zur Wolkenbeobachtung (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Augenbeobachtungen waren über viele Jahrzehnte die einzige operationell eingesetzte Methode zur Bestimmung von Wolkenparametern wie Wolkenart, Bedeckungsgrad und Wolkenuntergrenze. Die Zeitreihen reichen zurück bis in die 1940er-Jahre, an einigen Stationen sogar bis ins 19. und 18. Jahrhundert. Bis Mitte 2022 wurden die Augenbeobachtungen an allen synoptischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes eingestellt und durch boden- und satellitengestützte Fernerkundungssysteme und -ver-

fahren ersetzt. An den Bodenstationen beispielsweise liefern Laser-Ceilometer Informationen über die Wolkenuntergrenze und durch zeitliche Mittelung auch über den Wolkenbedeckungsgrad. Vor etwa 60 Jahren begann die flächendeckende Beobachtung von Wolken aus dem All. In dem von Deutschland koordinierten EUMETSAT CM SAF werden essentielle Klimavariablen, wie Wolkenparameter, Erdoberflächenalbedo und -temperatur, Strahlungsflüsse und auch Niederschlag, aus den Messungen verschiedener passiver Instrumente auf geostationären und polarumlaufenden Satelliten (z. B. Meteosat, Metop, NOAA) abgeleitet. Wichtige Wolkenparameter, die seit 2004 operationell bestimmt werden, sind: Bedeckungsgrad, Wolkentyp, wolkenoptische Dicke, effektiver Partikelradius, Wolkenphase, Wolkenoberkanten-druck, -höhe, -temperatur und vertikal integrierter Wolkenwassergehalt.

Durch Vergleiche mit bodengebundenen in situ durchgeführten und indirekten

Internationale Einbettung

Deutschland leistet die größten Beiträge für alle europäischen Satellitenprogramme der ESA, EUMETSAT und weitere EU-relevante Programme zur Klimaüberwachung. Im Rahmen von EUMETSAT erfolgt die Auswertung von Satellitendaten für die Klimaüberwachung durch CM SAF. Das Weltzentrum für Fernerkundungsdaten befindet sich beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und

stellt diese der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung.

Zur Etablierung neuer satellitengestützter und bodengebundener Beobachtungsmethoden mit aktiven Instrumenten (Radar und Lidar) beteiligt sich Deutschland an europäischen Forschungsprogrammen wie ACTRIS und EarthCARE. Des Weiteren ist Deutschland in zahlreichen Gremien der WMO vertreten.

Messungen wird eine kontinuierliche Qualitätskontrolle realisiert. Die Vertikalstruktur der Bewölkung wird seit 2004 mit einem 35-GHz-Radar kontinuierlich am Meteorologischen Observatorium Lindenberg gemessen. Aufgrund der geringen Schwächung elektromagnetischer Signale dieser Wellenlänge sowohl in der wolkenfreien als auch in der bewölkten Atmosphäre ist das Radar – im Gegensatz zu optischen Geräten – in der Lage, mehrschichtige Bewölkung in ihrer gesamten vertikalen Erstreckung zu detektieren bzw. Strukturen (Partikel) auch oberhalb optisch dicker Wolken zu erkennen. Durch Vergleiche der von Modellen simulierten Verteilungen und Eigenschaften der Wolken mit Beobachtungen können wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der Wolkenparametrisierung in Wettervorhersage- und Klimamodellen gewonnen werden.

Ressourcenbedarf

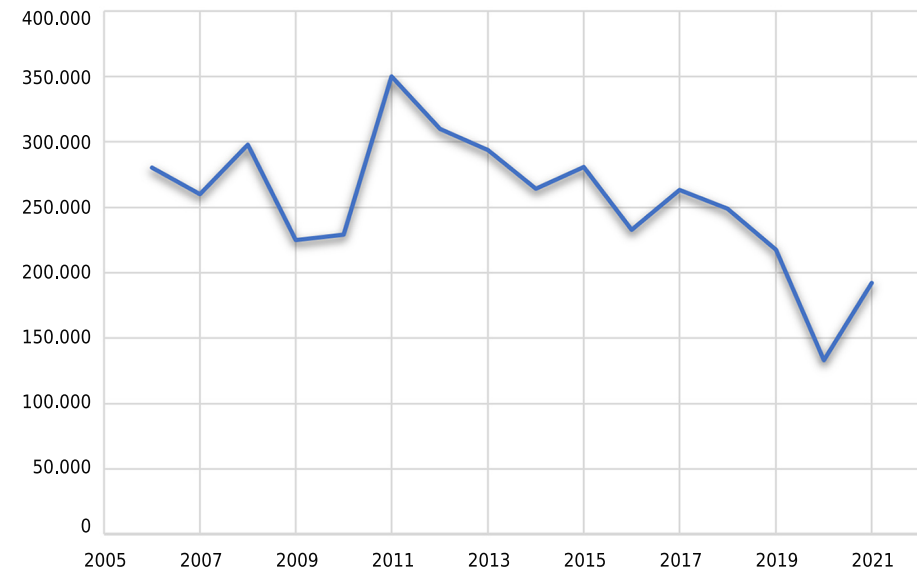
Bodengebundene und satellitengestützte Messverfahren schließen nicht nur die Lücke, die durch die Einstellung der Augenbeobachtungen entstanden ist, sondern liefern makro- und mikro-physikalische Wolkeneigenschaften, wie sie durch Augenbeobachtungen nie hätten bereitgestellt werden können. Neben dem Investitionsbedarf für neue Systeme erfordert die Wartung der Systeme, die Entwicklung entsprechender Retrievalmethoden, die Qualitätssicherung über lange Zeiträume sowie die Analyse und Homogenisierung der Daten zusätzliche personelle Ressourcen.

2.9 Blitzbeobachtungen

Blitze sind starke elektrische Entladungen zwischen Wolken oder zwischen Wolken und der Erde, die in Zusammenhang mit Gewittern auftreten. Blitze haben hohes Schadenspotenzial, da sie beispielsweise Ursache für Brände oder Schäden an elektrischer Infrastruktur und Geräten sein können, aber auch Menschenleben gefährden. Neben der Nutzung durch Wetterdienste sind die Blitzdaten daher unter anderem auch für die Luftfahrt, Energieversorgungsunternehmen, Versicherungen oder die Industrie von Interesse. Blitzbeobachtungen stellen eine ergänzende Informationsgrundlage für die wissenschaftliche Untersuchung von konvektiven Systemen, starken Stürmen und ähnlichen meteorologischen Ereignissen dar. Durch Blitze entstehen aufgrund der hohen Temperaturen aber auch relevante Mengen von Ozon und Stickoxiden. Auf Basis der elektrischen Entladung in der Atmosphäre kann das Auftreten von Blitzen messtechnisch erfasst und räumlich zugeordnet werden.



Anzahl der Blitze (Erd- und Wolke-Wolke-Blitze) pro Jahr in Deutschland seit 2006



▲ Abb. 2.9-1: Anzahl der Gesamtblitze. Es wurden nur Gesamtblitze mit einer Mindeststärke von 5 kA ausgewertet, um Einflüsse der kontinuierlich verbesserten Ortungsempfindlichkeit des Messnetzes auszuschließen. Basierend auf Messungen von LINET der Firma nowcast GmbH. (Quelle: nowcast GmbH)

Klimasignale

Auf Basis der Blitz-Ortungen aus den derzeitigen Erfassungssystemen ist es möglich, klimatologische Informationen abzuleiten, beispielsweise zur räumlichen Struktur oder dem typischen Jahres- und Tagesgang (Wapler 2013). Die Zeitreihen aus den verfügbaren Blitz-Erfassungssystemen sind derzeit eher zu kurz, um auf dieser Basis zuverlässige Aussagen über Klimatrends zu treffen. Durch Änderungen bei der Detektion der Blitze muss von Inhomogenitäten in der Zeitreihe ausgegangen werden. Die Erfassung globaler

Blitze ist wichtig für das Verständnis des Klimawandels und seiner Auswirkungen. Globale Blitzdetektionsnetzwerke erkennen Gewitter außerhalb der Reichweite von Radarsystemen oder Satelliten. Es gibt jedoch noch offene Fragen zum globalen Klimawandel und dem Zusammenhang zur globalen Blitzaktivität bzw. Gewitteraktivität. Führt ein wärmeres globales Klima zu einer Zunahme der globalen Blitzaktivität? Könnten die Beziehungen zwischen Blitzen und Niederschlag genutzt werden, um die Beziehung ■ ■ ■

◀ Foto 2.9-1: Gewitter über Frankfurt am Main

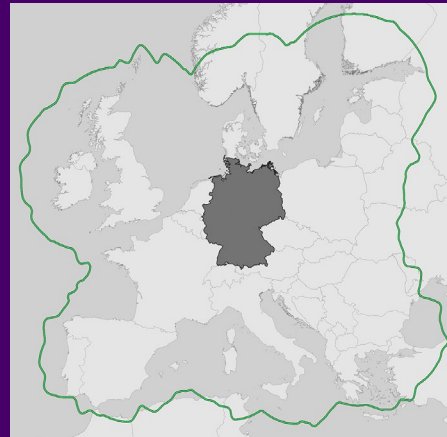


schen dem globalen Klimawandel und den globalen Niederschlägen besser zu verstehen? Dies sind nur zwei der vielen Fragen, die mit einer langen Aufzeichnung der Blitzaktivität auf globaler Ebene beantwortet werden können.

In Deutschland ist in den vergangenen 15 Jahren kein eindeutiger Trend bei der Blitzmenge feststellbar, die letzten Jahre zeigten im Vergleich sogar eher weniger Blitze. Die Blitzmenge ist jedoch nicht geeignet, Aussagen über Trends in der Häufigkeit und Stärke von Gewittern direkt abzuleiten. Hierzu sind weitere Analysen notwendig, die momentan für Deutschland aber noch ausstehen.

Gesetzliche Grundlagen

Laut Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) ist der Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme, auch zur Herausgabe amtlicher Warnungen über Wettererscheinungen, die in Bezug zu drohenden Wetter- und Witterungsereignissen mit hohem Schadenspotenzial stehen, eine der Aufgaben des DWD. Im Gegensatz zu anderen Parametern betreibt der Deutsche Wetterdienst kein eigenes Blitz-Beobachtungssystem, sondern lizenziert die Daten bei privatwirtschaftlichen Anbietern.



▲ Abb. 2.9-2: Abdeckung des europaweiten Messnetzes der Firma nowcast mit guter bis sehr guter Datenqualität (Quelle: nowcast GmbH)

Messungen in Deutschland

Traditionell wurde das Auftreten von Gewittern als eine von mehreren Wettererscheinungen durch Beobachter und Beobachterinnen an den Stationsstandorten notiert.

Heute erfolgt die Erfassung von Blitzen über die Messung der elektrischen Entladungen mithilfe von Messnetzen mit wenigen hundert Kilometern Abstand zwischen den einzelnen Sensoren. Ein Blitz erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das sich in alle Richtungen quasi mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. An den Antennen der Sensoren werden diese Signale registriert. Die Ermittlung des Blitzorts erfolgt durch Auswertung der Differenzen der Ankunftszeiten der Signale an den verschiedenen Sensoren

(das sogenannte »Time of Arrival«-Verfahren). Es lassen sich damit Genauigkeiten in der räumlichen Zuordnung unterhalb von 100 Metern erreichen.

In Deutschland sind zwei lokale Präzisions-Blitz-Ortungssysteme verfügbar, die durch privatwirtschaftliche Unternehmen betrieben werden: Der »Blitz Informationsdienst« der Firma Siemens (BLIDS), welcher die Sensoren und Technologie der Firma Vaisala benutzt, und das System LINET (Lightning Detection Network) der Firma nowcast GmbH (Betz et al. 2009), das seit 2006 auch vom DWD verwendet wird. Das europäische Messnetz der Firma nowcast besteht aus mehr als 190 Sensoren, installiert in 31 europäischen Ländern, und deckt damit Deutschland (komplett) und Europa (nahezu komplett) ab.

Des Weiteren verfügt der DWD zudem über globale Blitzdaten (GLD360) der Firma Vaisala (Pessi et al. 2009, Said et al. 2013 und 2016, Pohjola und Mäkelä 2013).

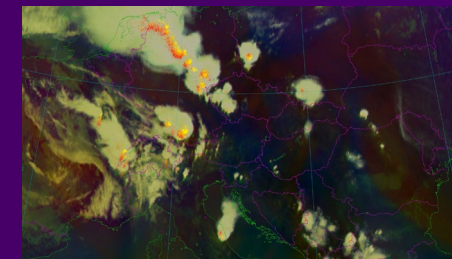
Die Systeme können neben der Position weitere Eigenschaften erfassen, beispielsweise die Stärke und Polarität von Blitzen und die Höhe von Wolkenblitzen.

Die Betreiber archivieren die Beobachtungen, sodass dort inzwischen Archive über die zurückliegenden Jahrzehnte vorliegen.

Zusätzlich zu den lokalen Präzisions-Messnetzen gibt es auch globale Blitzmessnetze mit verringerter Datenqualität (Ortungsgenauigkeit > 1 km), deren Daten weltweit zur Verfügung stehen, hier sind z. B. die Systeme der Firma

Vaisala (GLD360, siehe Abb. 2.9-4), des britischen nationalen Wetterdienstes (ATDnet), das Messnetz der Universität Washington (WWLLN) oder das System von nowcast (LINET global) zu nennen. Eine umfassende Beschreibung der vorhandenen Messtechnik gibt es im »Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume III – Observing Systems« der Weltorganisation für Meteorologie (WMO, siehe Link am Ende des Beitrags).

Eine Erfassung von Blitzen ist auch durch neue Sensoren (Lightning-Imager) auf der dritten Generation von Meteorat-Satelliten (Meteosat Third Generation, MTG) vorgesehen, die jedoch nur deutlich geringere räumliche Auflösungen erreichen werden als die bodenbasierten Blitzerfassungssysteme. Die satellitenbasierten Blitzbeobachtungen werden frei zugänglich sein und stellen eine relevante Datenquelle für die Klimaforschung dar.

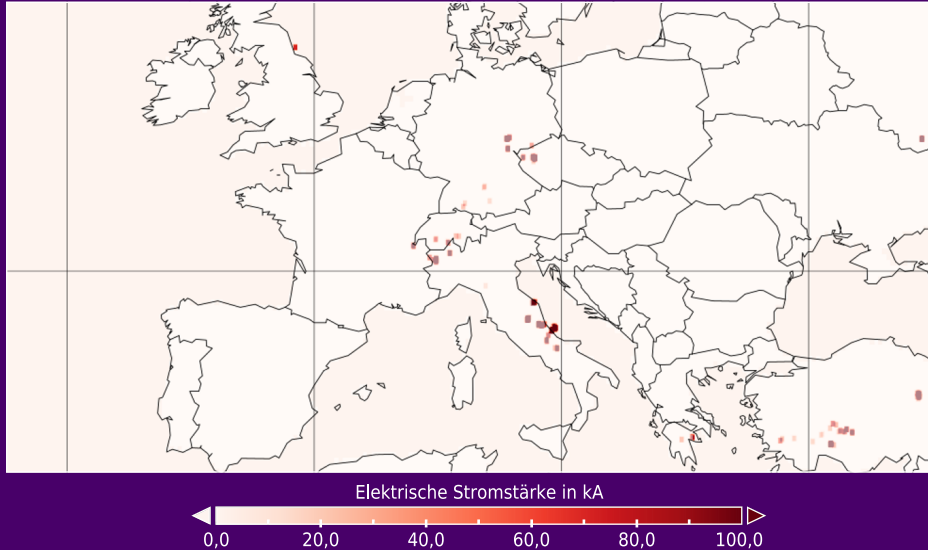


▲ Abb. 2.9-3: Detektierte Blitze am 20.06.2013 in der Stunde vor 15 UTC. Die ältesten Blitze sind in Rot, die jüngsten in Gelb dargestellt. (Quelle: Christo Georgiev/NIMH)





Blitzvorfälle am 02. 08. 2020, 14:45 bis 15:00 UTC, GLD360

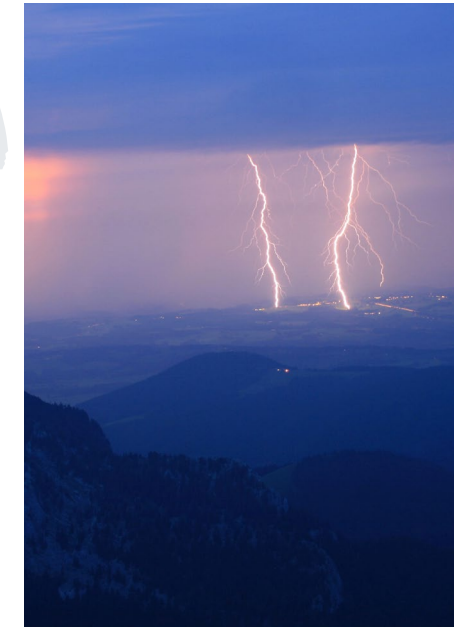


▲ Abb. 2.9-4: Blitze (Erd- und Wolke-Wolke-Blitze) und berechnete Stromstärken am 02.08.2020 zwischen 14:45 und 15:00 UTC, basierend auf GLD360-Daten (Quelle: DWD nach Vaisala)

Internationale Einbettung

Inwieweit eine grenzübergreifende Beobachtung stattfindet, hängt vom Engagement der privatwirtschaftlichen Betreiber ab. Datennutzer beziehen die Daten direkt von diesen Betreibern. Ein systematischer Datenaustausch, wie er bei anderen Parametern zwischen staatlichen Organisationen stattfindet, erfolgt daher bei diesen Daten nicht. Zusätzlich zum europäischen Netzwerk betreibt nowcast noch weitere internationale lokale Präzisions-Messnetze, die komplett die USA, Australien und Teile Asiens, Südamerikas und Afrikas abdecken.

Eine weitere Zusammenarbeit erfolgt in Europa im Rahmen der European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID). Die Betreiber der Blitzortungssysteme sind auch in weiteren europäischen Ländern aktiv. Beispielsweise nutzt BLIDS (Siemens) über 155 verbundene Messstationen und ortet Blitze in ganz Europa, inklusive der Kanarischen Inseln und Madeira. Nicht abgedeckt sind die Staaten der ehemaligen Sowjetrepubliken in Europa. Basis sind Messnetze verschiedenster nationaler Wetterdienste und privatwirtschaftlicher Betreiber, deren Messantennen mit den EUCLID-Zentralrechnern verbunden sind.

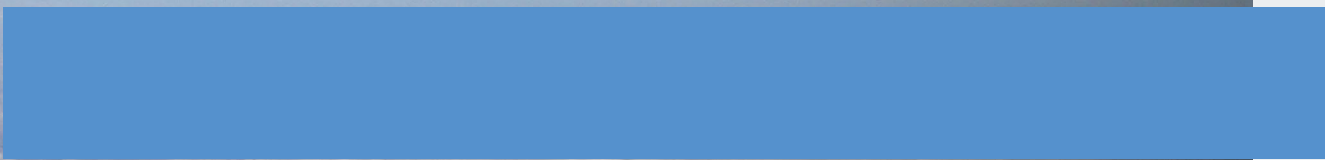


Ressourcenbedarf

Die Blitz-Erfassungssysteme in Deutschland werden durch privatwirtschaftliche Unternehmen betrieben und die Daten werden zur Nutzung für amtliche Aufgaben, beispielsweise durch den Deutschen Wetterdienst, lizenziert. In vielen europäischen Ländern sind die Betreiber die Wetterdienste selbst. Die ermittelten Daten werden wie andere gemessene Wetterinformationen kostenfrei der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt.

2

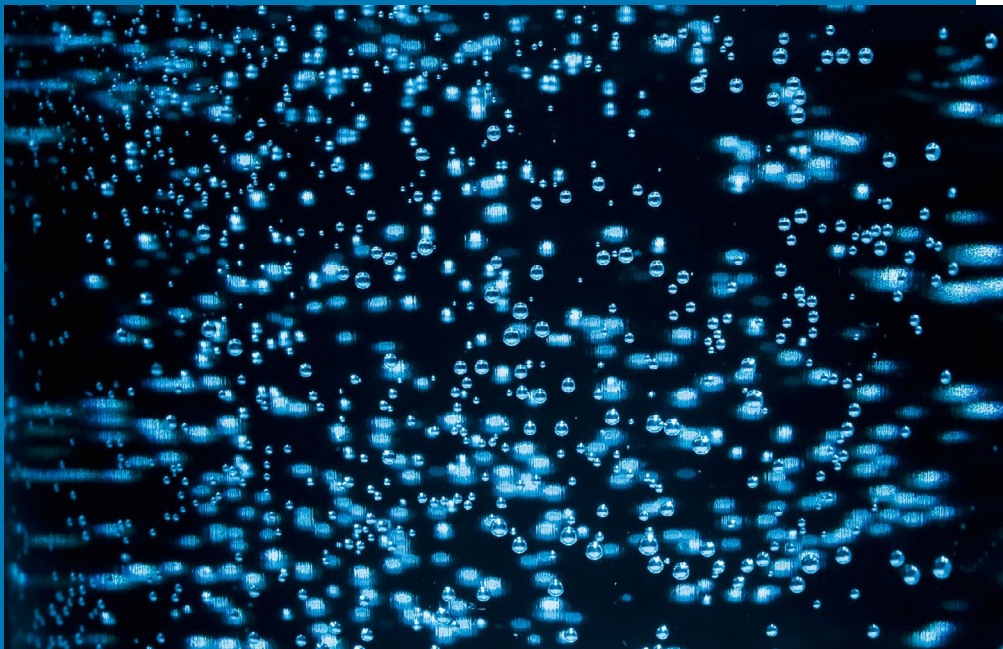
Atmosphärische Beobachtungen



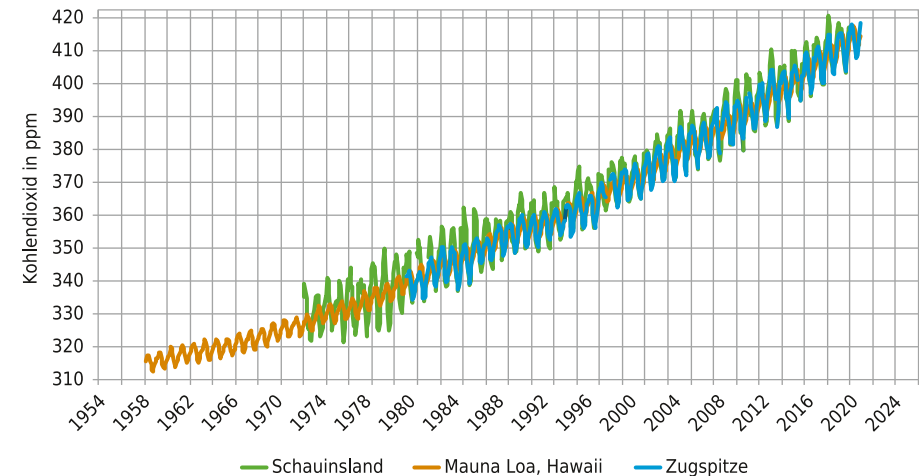
Zusammensetzung der Atmosphäre

2.10 Kohlendioxid

Die wichtigste Ursache für die globale Erwärmung sind vom Menschen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zusätzlich emittierte Treibhausgase. Bedingt durch seine hohen atmosphärischen Konzentrationen ist dabei Kohlendioxid (CO₂) das bedeutendste Klimagas, auf welches Einfluss genommen werden kann. Die globalen Konzentrationen von CO₂ sind seit Beginn der Industrialisierung ab 1750 um ca. 47 % angestiegen. Demgegenüber waren die CO₂-Konzentrationen in den vorangegangenen 10.000 Jahren annähernd konstant. Der jetzige Anstieg an CO₂ ist etwa 100-mal schneller als jemals zuvor in der Vergangenheit.



Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittel)



▲ Abb. 2.10-1: Zeitreihen von Kohlendioxid an den deutschen GAW-Stationen Schauinsland und Zugspitze im Vergleich mit der weltweit längsten CO₂-Messreihe von Mauna Loa, Hawaii (Quelle: UBA, NOAA Global Monitoring Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, WMO und WDCGG)

Klimasignale

Lange CO₂-Messreihen ergeben ein zuverlässiges Maß für den globalen Anstieg von CO₂. Sie dokumentieren kontinuierlich den Effekt der Verbrennung fossiler Brennstoffe auf die Atmosphäre. Dank ihrer Genauigkeit ermöglichen sie der Wissenschaft, die Verbrennung fossiler Brennstoffe von der jahreszeitlichen Fluktuation der Biosphäre zu unterscheiden. Dies ergibt eine zuverlässige Grundlage, um die langfristige Veränderung des CO₂-

Vorrats in der Atmosphäre mit Klimamodellen zu analysieren und zukünftige Szenarien zu berechnen. Während in den 1950er-Jahren der jährliche Anstieg im Mittel noch bei 0,55 ppm CO₂ lag, dokumentieren die Differenzen der Jahresmittelwerte im vergangenen Jahrzehnt etwa einen Anstieg von 2,2 ppm pro Jahr. Gegenüber den 1950er-Jahren wurde damit die globale CO₂-Produktion mehr als verdreifacht.

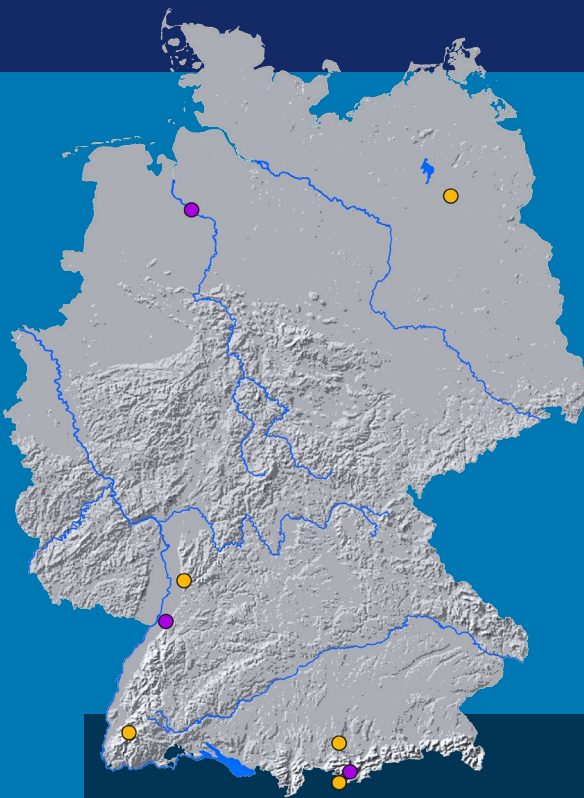


Foto 2.10-1: Blick auf Schneefernerhaus unten links und Gebäude auf der Zugspitze ▶



◀ Abb. 2.10-2: Diese Karte zeigt in Gelb die fünf Standorte, an denen in Deutschland CO₂ in situ, d. h. in der Umgebungsluft, gemessen wird. Dies sind die drei GAW-Stationen Neuglobsow, Schauinsland, Zugspitze/Hohenpeißenberg sowie die Universität Heidelberg. An den violett dargestellten Standorten Bremen, Karlsruhe und Garmisch-Partenkirchen wird CO₂ im Rahmen des TCCON-Messnetzes in der Gesamtsäule der Atmosphäre gemessen. (Quelle: UBA)

Messungen in Deutschland und im Ausland

Weltweit finden hochgenaue In-situ-Messungen von atmosphärischem CO₂ in der Umgebungsluft, wie sie von C. D. Keeling 1958 auf Mauna Loa (Hawaii) begründet wurden, statt. So wird in Deutschland seit 1972 auf dem Schauinsland und seit 1981 auf der Zugspitze und in Neuglobsow CO₂ gemessen. Hinzu kommen seit 2006 CO₂-Messungen an der Station Hohenpeißenberg. Die Daten der in Deutschland liegenden GAW-Stationen sind über das Weltzentrum für Treibhausgase, WDCGG, Tokio abrufbar. Seit 2004 werden an ca. 20 Stationen weltweit Messungen der CO₂-Konzentra-

tion mithilfe der solaren Absorptionsspektroskopie durchgeführt. Diese Messungen liefern die Konzentration in der Gesamtsäule, vom Beobachtungspunkt am Boden bis zum Oberrand der Atmosphäre. Die Messungen sind innerhalb des Total Carbon Column Observing Network (TCCON) organisiert. In Deutschland werden derartige Messungen in Bremen, Karlsruhe und in Garmisch-Partenkirchen durchgeführt. Die Messungen sind in das GAW-Programm der WMO eingebunden. Seit 1996 wird an der Universität Heidelberg das Klimagas CO₂ im urbanen Umfeld gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass eine lange und hochpräzise Messreihe an solchen zusätzlich belasteten Standorten erfolgreich dazu verwendet werden kann, um für ein regionales Einzugsgebiet die statistisch

basierte Berichterstattung von Treibhausgasemissionen, z. B. für UNFCCC, mit Messungen unabhängig zu überprüfen. Im Rahmen des deutschen Beitrags zu GAW werden an der GAW-Globalstation Neumayer in der Antarktis seit 1994 von der Universität Heidelberg CO₂-Messungen auf der Basis von Kanisterproben durchgeführt. TCCON-Messungen unter deutscher Federführung im Ausland werden in Spitzbergen/Norwegen, Białystok/Polen, Orléans/Frankreich und auf Ascension durchgeführt. Seit 2003 wird die globale Verteilung des atmosphärischen Kohlendioxids auch mittels Satelliten erfasst. Diese Messungen sind zwar ungenauer als Bodenmessungen, liefern aber großräumig repräsentative räumliche Informationen. Von beson-

derem Interesse ist es hierbei, die natürlichen, aber auch die anthropogenen CO₂-Emissionen global mit möglichst guter räumlicher und zeitlicher Auflösung zu bestimmen. Dies erfordert Satellitenmessungen mit hoher Empfindlichkeit für Änderungen des CO₂ nahe am Erdboden, also nahe den Quellen. Das erste Satelliteninstrument, welches diese Anforderungen erfüllt, ist das von Deutschland federführend entwickelte SCIAMACHY-Instrument auf dem europäischen Umweltsatelliten ENVISAT.

Gesetzliche Grundlagen

Im Rahmen des deutschen Beitrags zum internationalen Programm zur Globalen Atmosphärenüberwachung, GAW, ist das Umweltbundesamt der zuständige Partner zur Messung von CO₂. Deutschland hat durch den national durchgeführten Emissionshandel eine weitere gesetzlich verankerte Basis, für die neben präzisen statistischen Erhebungen auch zuverlässige und genaue Messreihen zu den bestehenden CO₂-Konzentrationen relevant sind. Auf Grundlage der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 wurde das seit 2005 bestehende System zur Überwachung der Emission von Treibhausgasen aktualisiert.

Internationale Einbettung

Die GAW-Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg liefert zusammen mit den Regionalstationen Schauinsland und Neuglobsow den Kern des deutschen CO₂-Beitrags zu GCOS. Im Rahmen der D-A-CH-Kooperation zwischen den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz werden die an den Bergstationen Zugspitze, Hohenpeißenberg, Hoher Sonnblick und Jungfraujoch gemessenen Zeitreihen gemeinsam analysiert, um damit Aussagen von größerer Sicherheit und räumlicher Repräsentativität zu erhalten. Die gemessenen Daten werden regelmäßig an das WDCGG gesendet. Die Messungen basieren auf der in GAW international geltenden Standardreferenzskala für Kohlendioxid, die von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Boulder, Colorado zur Verfügung gestellt wird. Die Qualitätssicherung ist eingebunden in regelmäßig durchgeführte Ringversuche im Rahmen des integrierten CarboEurope-Projekts sowie des WMO/GAW-Programms. Die Gesamtsäulenmessungen sind im Rahmen von TCCON international eingebettet.



▲ Foto 2.10-2: Messgeräte am Schneefernerhaus

Ressourcenbedarf

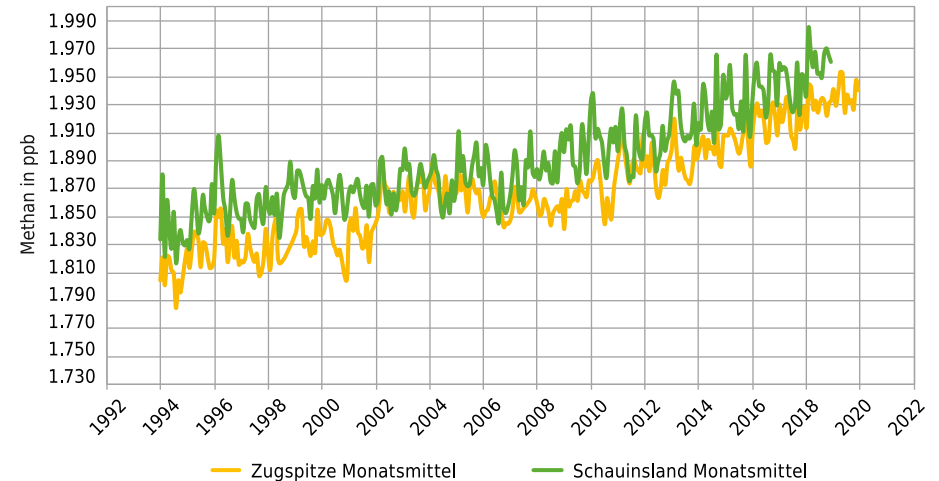
Bei den drei GAW-Stationen in Deutschland werden die CO₂-Messungen im Rahmen des Dauerbeobachtungsprogramms des Umweltbundesamtes langfristig finanziert. Die Messstellen sind personell unterbesetzt. Die TCCON-Messungen werden bisher nur zum Teil institutionell finanziert und sind derzeit von Zusatzfinanzierungen im Rahmen von Drittmittelprojekten abhängig. Eine kontinuierliche Finanzierung wird dringend benötigt, um den dauerhaften Betrieb sicherzustellen.

2.11 Methan

Seit dem vorindustriellen Zeitalter ist das Vorkommen von Methan (CH_4) in der Atmosphäre aufgrund anthropogener Aktivitäten um mehr als 270 % gestiegen. In der Gruppe der langlebigen Treibhausgase leistet Methan nach Kohlendioxid den zweitgrößten Beitrag zur globalen Erwärmung. Noch nie zuvor gab es in den vergangenen 650.000 Jahren in der Erdatmosphäre so hohe CH_4 -Konzentrationen. Trotz langsamerem Anstieg seit 1990 und einer Stagnation der Konzentration auf hohem Niveau bis 2005 prognostizieren Klimamodelle bei zunehmender Erwärmung erneut eine beschleunigte Zunahme des Methans. Seit 2007 beobachten die weltweiten Netzwerke und Satelliten wieder einen Anstieg von Methan.



Methankonzentration in der Atmosphäre (Monatsmittel)

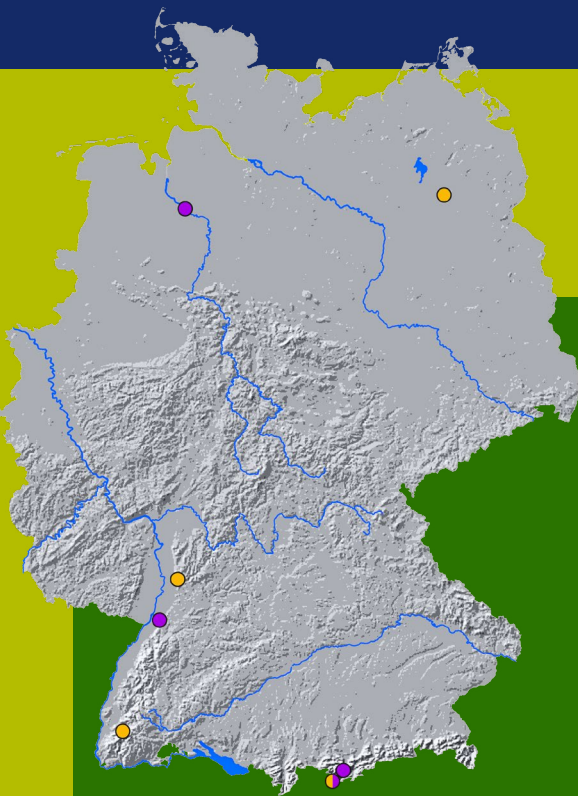


▲ Abb. 2.11-1: Methanmessreihen an den Stationen Schauinsland (grün) und Zugspitze (gelb). Auch an der Station Schauinsland, die wegen ihrer geringeren Höhenlage erhöhte Methankonzentrationen misst, kann der Trend in der freien Troposphäre erfasst werden. (Quelle: UBA)

Klimasignale

Hochpräzise lange Zeitreihen ergeben ein zuverlässiges Bild über die Methankonzentrationen, die sich letztendlich aus dem Zusammenwirken aller Quellen und Senken ergeben. Obwohl die Quellen für Methan bekannt sind, können die Trends der Quellen und ihr Zusammenwirken mit den Senken noch nicht hinreichend erklärt werden. Bei insgesamt noch steigendem Methantrend hat der Zuwachs von Methan in

den letzten zweieinhalb Jahrzehnten kontinuierlich abgenommen. Die Gründe für diese kontinuierliche Abnahme und die sich daraus ergebenden Folgen für die zukünftige Erwärmung der Atmosphäre werden noch nicht ausreichend verstanden. Lange und zuverlässige Zeitreihen sind hier von grundlegender Bedeutung, damit das Zusammenwirken von Quellen und Senken in Zukunft hinreichend erklärt werden kann.



◀ Abb. 2.11-2: Diese Karte zeigt in Gelb die vier Standorte, an denen in Deutschland Methan in situ, d. h. in der Umgebungsluft, gemessen wird. Dies sind die drei GAW-Stationen Neuglobsow, Schauinsland, Zugspitze sowie die Universität Heidelberg. An den violett dargestellten Standorten Bremen, Karlsruhe, Garmisch-Partenkirchen und Zugspitze wird Methan im Rahmen des TCCON-Messnetzes in der Gesamtsäule der Atmosphäre gemessen. (Quelle: UBA)

Messungen in Deutschland und im Ausland

In-situ-Messungen von atmosphärischem Methan werden in Deutschland seit 1991 auf dem Schauinsland durchgeführt und seit 1994 auf der Zugspitze und in Neuglobsow. Diese werden ergänzt durch Kanisterprobenahmen an der Station Hohenpeißenberg, die seit 2006 im Rahmen des weltweiten NOAA/ESRL-Programms gemessen werden. Die Daten der in Deutschland liegenden GAW-Stationen sind über das Welt Datenzentrum für Treibhausgase, WDCGG, Tokio abrufbar.

Seit 1996 wird an der Universität Heidelberg Methan im urbanen Umfeld

gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass eine lange und hochpräzise Messreihe an solch einem Standort erfolgreich dazu verwendet werden kann, um für ein regionales Einzugsgebiet die statistisch basierte Berichterstattung von Treibhausgasemissionen, z. B. für UNFCCC, unabhängig mit Messungen zu überprüfen.

Seit 2004 werden an etwa 20 Stationen weltweit Messungen der Methankonzentration mithilfe der solaren Absorptionsspektroskopie mit neuartigen Geräten im nahen Infrarotbereich durchgeführt. Diese Messungen liefern die Konzentration in der Gesamtsäule, vom Beobachtungspunkt am Boden bis zum Oberrand der Atmosphäre. Die Auswertung ermöglicht es, eine mittlere Konzentration in der Troposphäre abzuleiten. Die Messungen sind innerhalb des Total

Carbon Column Observing Network (TCCON) organisiert. In Deutschland werden derartige Messungen in Bremen, Karlsruhe und in Garmisch-Partenkirchen durchgeführt. Zudem werden auf der Zugspitze seit 1995 Langzeitmessungen mit einem FTIR-System im klassischen mittleren Infrarotbereich durchgeführt, die in das Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) eingebunden sind und ebenfalls hochpräzise Methan-Säulengehalte liefern. Die Messungen sind in der Globalen Atmosphärenüberwachung GAW der WMO integriert.

An der GAW-Globalstation Neumayer in der Antarktis werden im Rahmen des deutschen Beitrags zur Globalen Atmosphärenüberwachung (GAW) seit 1987 Methanmessungen im Rahmen von Kanisterprobenahmen durch die Universität Heidelberg durchgeführt.

TCCON-Messungen unter deutscher Federführung im Ausland werden in Spitzbergen, Białystok, Orléans und auf Ascension durchgeführt.

Seit 2003 wird die globale Verteilung des atmosphärischen Methans auch mittels Satelliten erfasst.

Gesetzliche Grundlagen

Im Rahmen von GAW, dem Teilsystem von GCOS zur Überwachung essentieller Klimavariablen, ist das Umweltbundesamt der zuständige Partner zur Messung von Methan. Auf Grundlage der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 wurde das seit 2005 bestehende System zur Überwachung der Emission von Treibhausgasen aktualisiert.





▲ Foto 2.11-1: TCCON-Observatorium am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena in den USA

Internationale Einbettung

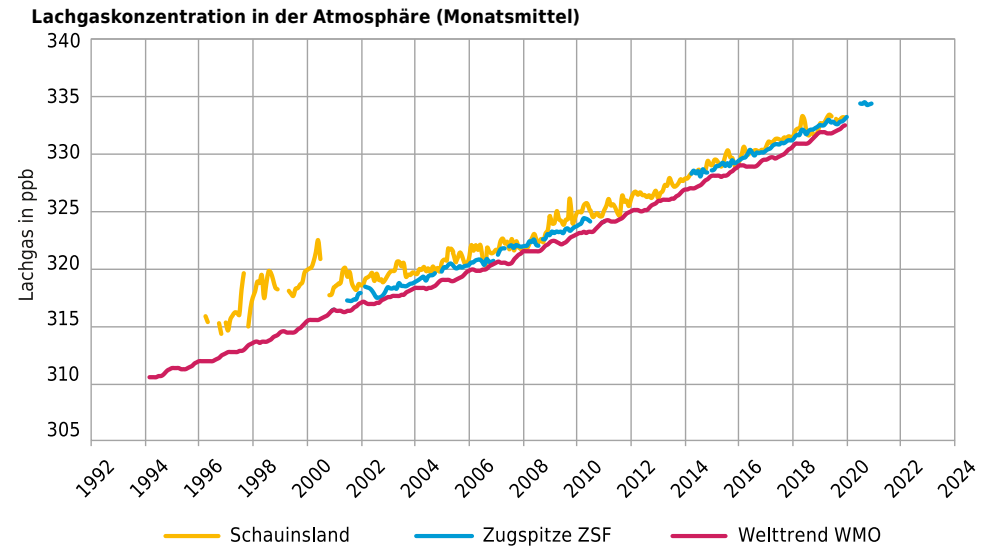
Die GAW-Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg liefert zusammen mit den Regionalstationen Schauinsland und Neuglobsow den Kern des deutschen Methan-Beitrags zu GCOS. Im Rahmen der D-A-CH-Kooperation zwischen den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz werden die an den Bergstationen Zugspitze, Hohenpeißenberg, Hoher Sonnblick und Jungfrauoch gemessenen Zeitreihen gemeinsam analysiert, um damit Aussagen von größerer Sicherheit und räumlicher Repräsentativität zu erhalten. Die gemessenen Reihen werden regelmäßig an das Weltzentrum für Klimagase (WDCGG) in Tokio gesendet. Die Messungen basieren auf der in GAW international geltenden Standardreferenzskala für Methan, die von der NOAA in Boulder, Colorado, zur Verfügung gestellt wird. Die Qualitätssicherung ist ferner eingebunden in regelmäßig durchgeführte Ringversuche im Rahmen des integrierten CarboEurope-Projekts sowie des WMO/GAW-Programms. Die Gesamtsäulenmessungen sind im Rahmen von TCCON und NDACC international eingebettet.

Ressourcenbedarf

An den drei GAW-Stationen in Deutschland sind die Methanmessungen im Rahmen des Dauerbeobachtungsprogramms des Umweltbundesamtes langfristig finanziert. Die Messstellen sind personell unterbesetzt. Die TCCON-Messungen werden bisher nur zum Teil institutionell finanziert und sind derzeit von Zusatzfinanzierungen im Rahmen von Drittmittelprojekten abhängig. Eine kontinuierliche Finanzierung wird dringend benötigt, um den dauerhaften Betrieb sicherzustellen.

2.12 Weitere Treibhausgase

Ohne ihre beiden wichtigsten Vertreter CO_2 und CH_4 leisten die langlebigen Treibhausgase (LLCF) insgesamt noch einen sehr hohen Anteil am Treibhauseffekt von etwa 18 %. Am bedeutendsten sind Lachgas (N_2O), Schwefelhexafluorid (SF_6) und halogenierte, klimawirksame Spurensbstanz. In dieser Gruppe gibt es einige Substanzen mit extrem langer Lebensdauer, wie z. B. SF_6 mit 3.200 Jahren oder NF_3 mit ca. 640 Jahren, die noch sehr lange auf das globale Klima einwirken werden.



▲ Abb. 2.12-1: Zeitreihen von Lachgas an der GAW-Regionalstation Schauinsland (gelb), an der Plattform Zugspitze (blau) und in Rot der Welttrend der WMO (Quelle: UBA, WDCGG und WMO)

Klimasignale

Lachgas leistet den drittgrößten Beitrag zur globalen Erwärmung durch langlebige Klimagase. Im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter (1750) ist sein Vorkommen in der Atmosphäre nur um 20 % gestiegen. Dabei ist im Vergleich zu CO_2 sein Einfluss auf die Erwärmung der Atmosphäre, auf die Dauer von 100 Jahren betrachtet, 300-mal stärker. Etwa 40 % des in die Atmosphäre emittierten N_2O gehen auf menschliche Aktivitäten zurück. Der Rest stammt aus natürlichen Quellen. Der deutlich größere Anteil an Land-

flächen auf der Nordhalbkugel und die Anwendung von Kunstdünger in den mittleren Breiten sind der Hauptgrund für einen kleinen Nord-Süd-Gradienten der Lachgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Hochpräzise und lange Zeitreihen auf der nördlichen und südlichen Hemisphäre sind hier eine wichtige Grundlage, damit die zeitliche Entwicklung der Quellen besser verstanden und prognostiziert werden kann. Zu diesem Zweck müssen die In-situ-Messreihen mit einer sehr hohen Genauigkeit gemessen werden.

Messungen in Deutschland und im Ausland

In-situ-Messungen von Lachgas (N_2O), Schwefelhexafluorid (SF_6) und von dem indirekt auf das Klima wirkenden Wasserstoff werden in Deutschland vom Umweltbundesamt an den GAW-Stationen Schauinsland und Zugspitze durchgeführt und von der Universität Heidelberg im urbanen Umfeld.

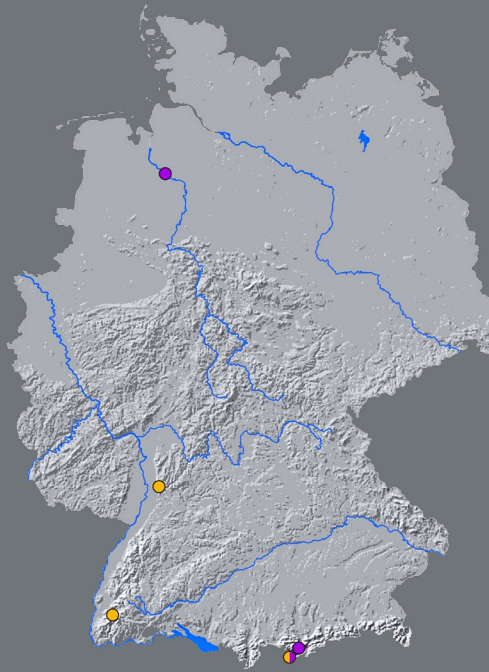
Die Daten der in Deutschland liegenden GAW-Stationen sind über das Weltzentrum für Treibhausgase, WDCGG, Tokio abrufbar.

Seit 2004 werden an etwa 20 Stationen weltweit Messungen langlebiger klimarelevanter Spurengase mithilfe der solaren Absorptionsspektroskopie durchgeführt. Diese Messungen liefern die Konzentration in der Gesamtsäule, vom Beobachtungspunkt am Boden bis zum Oberrand der Atmosphäre. Die Messungen sind innerhalb des Total Carbon Column Observing Network (TCCON) organisiert. In Deutschland werden derartige Messungen in Bremen und in Garmisch-Partenkirchen durchgeführt. TCCON-Messungen ermöglichen es, die N_2O -Gesamtsäule zu erfassen, die Möglichkeiten und Grenzen der Messungen werden derzeit analysiert.

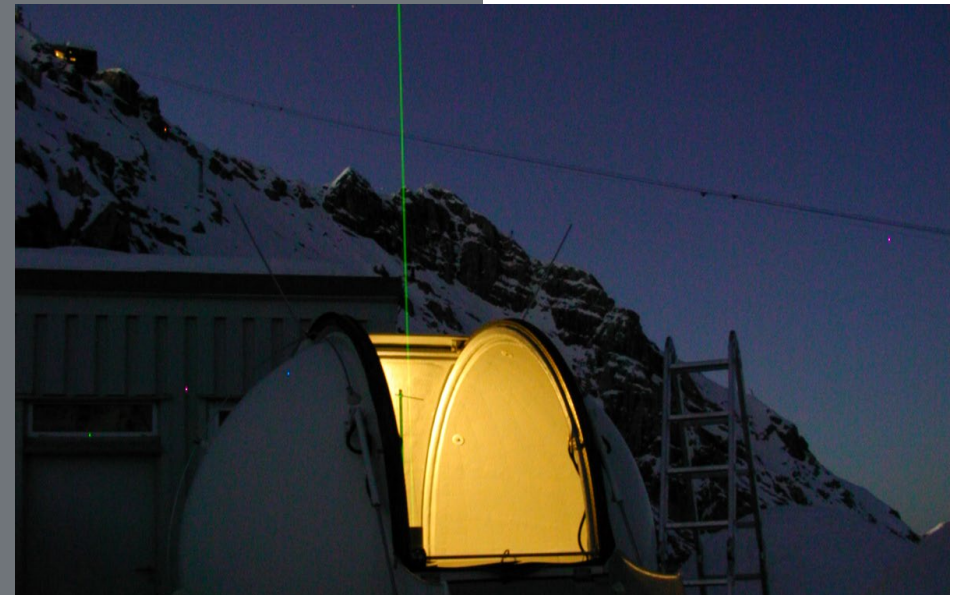
Seit 1990 werden vergleichbare Messungen mithilfe der solaren Absorptionsspektroskopie in anderen Spektralbereichen als bei TCCON durchgeführt, welche die Erfassung einer Vielzahl weiterer Substanzen, einschließlich SF_6 , ermöglichen. Diese Messungen werden im Rahmen des Network for the

Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) durchgeführt – u. a. auf der deutschen NDACC-Station Zugspitze.

Der langfristige Einfluss des wichtigsten Klimagases Wasserdampf wird am Standort Zugspitze/Schneefernerhaus untersucht. Dort werden seit 2007 mit



▲ Abb. 2.12-2: Diese Karte zeigt in Gelb eine Übersicht der beiden GAW-Messstellen Schauinsland und Zugspitze sowie den Standort Universität Heidelberg (im urbanen Umfeld) für Lachgas, SF_6 und Wasserstoff in Deutschland. An den TCCON-Standorten Bremen und Garmisch-Partenkirchen sowie dem NDACC-Standort Zugspitze (violett) wird die atmosphärische Gesamtsäule von Lachgas gemessen. An der Zugspitze werden Wasserdampfvertikalprofile bis zu einer Höhe von 12 km langfristig gemessen, derzeit erfolgt eine Erweiterung bis 30 km. (Quelle: DWD)



▲ Foto 2.12-1: Das Lidar auf dem Dach der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)

einem IR-Lidar (DIAL) bei klaren Nächten troposphärische Wasserdampfprofile bis zu einer Höhe von 12 km gemessen. Seit 1996 werden an der Universität Heidelberg die Klimagase N_2O , SF_6 und das indirekt als Klimagas wirksame Wasserstoffgas im urbanen Umfeld gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass lange und hochpräzise Messreihen an solchen Standorten erfolgreich dazu verwendet werden können, um für ein regionales Einzugsgebiet die statistisch basierte Berichterstattung von Treibhausgasemissionen (UNFCCC) unabhängig mit Messungen zu überprüfen.

Gesetzliche Grundlagen

Aufgrund der offiziellen Teilnahme an GAW, dem Teilsystem von GCOS zur Überwachung atmosphärischer Klimavariablen, werden in Deutschland Lachgas (N_2O), Schwefelhexafluorid (SF_6), Wasserstoff (H_2) und halogenierte klimawirksame Substanzen gemessen. Mit Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls durch die EU bestehen seitdem Begrenzungs- und Reduzierungsverpflichtungen. Hierzu wurde auch das seit 2005 betriebene System zur Überwachung der Emission von Treibhausgasen mit der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 novelliert. Wesentliche Ziele sind die Verbesserung der Überwachung und Verifizierung von Emissionen aus Quellen und des Abbaus aus Senken.

Internationale Einbettung

Zusammen mit der Regionalstation Schauinsland liefert die GAW-Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg den Kern des deutschen Beitrags der Lachgas- und SF₆-Messungen zu GCOS. Die gemessenen Datenreihen werden regelmäßig an das Weltdatazentrum für Klimagase (WDCGG) in Tokio gesendet. Die Messungen basieren auf den in GAW international geltenden Standardreferenzskalen für N₂O und SF₆, die von der NOAA in Boulder, Colorado, zur Verfügung gestellt werden und auf der Referenzskala für Wasserstoff, die vom Max-Planck-Institut in Jena gepflegt wird. Die Qualitätssicherung ist eingebunden durch regelmäßig durchgeführte Ringversuche beim CarboEurope-Projekt und Ringversuche der WMO. Die Gesamtsäulenmessungen sind im Rahmen von TCCON und NDACC international eingebettet. Die große Bedeutung dieser Messungen liegt in ihrem Nutzen zur Validierung von Satelliteninstrumenten, da diese eine vergleichbare Beobachtungsgeometrie besitzen und ebenfalls die Gesamtsäule messen. Im Zuge von internationalen Flugzeugkampagnen wurden die TCCON-Gesamtsäulenmessungen an die bestehenden In-situ-Messungen angepasst. Die TCCON- und NDACC-Messungen sind beide im GAW-Programm der WMO akzeptiert.



▲ Foto 2.12-2: Messinstrumente auf der Terrasse des fünften Obergeschosses der Messplattform Zugspitze

Ressourcenbedarf

Sowohl die TCCON- als auch die NDACC-Messungen werden bisher nur zum Teil institutionell finanziert und sind derzeit von Zusatzfinanzierungen im Rahmen von Drittmittelprojekten abhängig. Eine kontinuierliche Finanzierung wird

dringend benötigt, um den dauerhaften Betrieb sicherzustellen. In Deutschland gibt es bisher keine kontinuierlichen Messreihen von halogenierten klimawirksamen Spurengasen in der Umgebungsluft (in situ).

2.13 Anthropogene Treibhausgasflüsse

Die Anthroposphäre, d. h. der vom Menschen geschaffene oder beeinflusste Lebensraum, setzt u. a. die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorierte Gase frei. Als Treibhausgasflüsse werden sowohl der Eintrag in die Atmosphäre durch Quellen (z. B. durch Nutzung fossiler Energieträger) als auch das Entfernen aus der Atmosphäre durch Senken (z. B. Vegetation) bezeichnet.



Trends

Damit sich die Treibhausgas-Konzentrationen stabilisieren, muss die Größe der Quellen der Größe der Senken entsprechen – was als »netto-null« bezeichnet wird. Allerdings sind in vielen Regionen der Welt die Netto-Treibhausgasflüsse weit über null und wegen wachsender anthropogener Aktivitäten sogar steigend.

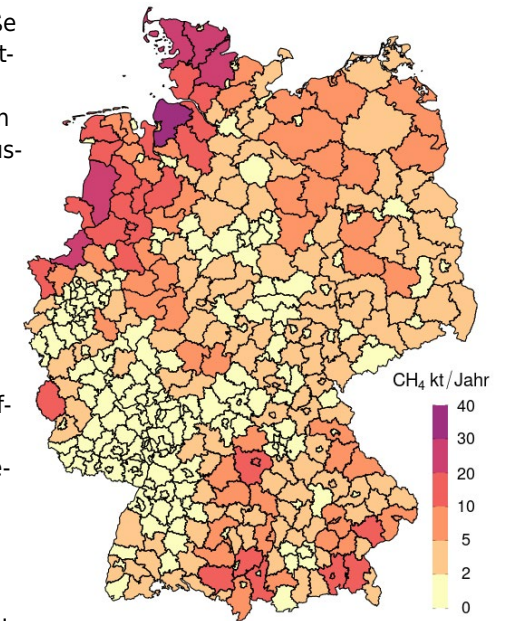
Für das wichtigste Treibhausgas CO₂ bestimmt die global steigende Nutzung fossiler Energieträger den Trend, abgesehen vom kurzfristigen, ca. 7%igen temporären Einschnitt aufgrund der Corona-Krise. Nur für den europäischen Kontinent ist eine systematische Tendenz zur Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen über die letzten Jahrzehnte erkennbar (Friedlingstein et al. 2021).

Die weltweiten Emissionen von CH₄ sind in den letzten 20 Jahren um fast 10 % gestiegen, hauptsächlich aus zwei Gründen: die zunehmende Freisetzung von Erdgas während Produktion und Transport von Öl, Gas und Kohle sowie die weltweit wachsende Fleischproduktion (Schiermeier 2020). In Europa ist es gelungen, die Methanemissionen durch Reduktion der Tierhaltung, durch Schließungen von Steinkohleminen und durch Maßnahmen in der Abfallwirtschaft zu reduzieren.

N₂O weist über die letzten Dekaden steigende Emissionen wegen zunehmender Düngung auf (Copernicus 2019).

◀ Abb. 2.13-1: Eine Vielzahl von Einzelquellen trägt zu den anthropogenen Treibhausgasemissionen bei. (Quelle: DWD)

Landwirtschaftliche CH₄-Emissionen pro Landkreis für das Jahr 2018



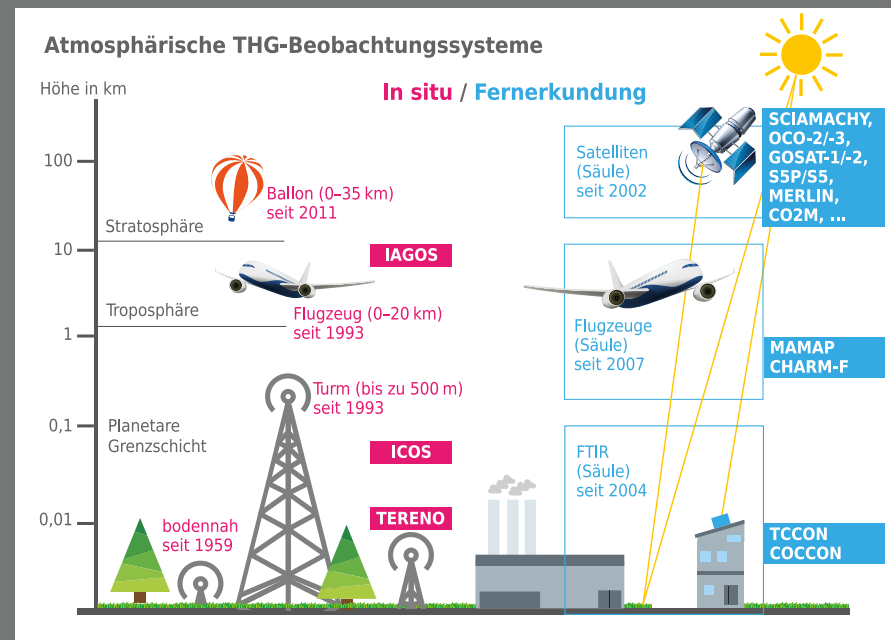
▲ Abb. 2.13-2: Die CH₄-Emissionen Deutschlands sind hauptsächlich durch die Landwirtschaft geprägt. (Quelle: UBA)

Für Deutschland erfasst das Umweltbundesamt (UBA) die Emissionen der Treibhausgase sektorenweise und berichtet deren Trends in den »National Inventory Reports« entsprechend der Richtlinien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese hauptsächlich aus Statistiken abgeleiteten Daten (siehe z. B. Abb. 2.13-2) können idealerweise durch die beobachtungs-basierten GCOS Essential Climate Variables (ECVs) ergänzt werden (siehe Abb. 2.13-3).

Beobachtungssysteme

In Deutschland werden großräumig repräsentative Messungen an neun hohen Türmen im Rahmen der europäischen Infrastruktur Integrated Carbon Observation System (ICOS) durchgeführt. Zusätzlich liefern Messungen an Masten und am Boden (z. B. die Terrestrial Environmental Observatories, TERENO) die typischen Flüsse für bestimmte Ökosysteme. Bei den Bodenstationen sind insbesondere die vieljährigen Messreihen des UBA an den Bergstationen Zugspitze und Schauinsland zu erwähnen, welche die Trends der Hintergrundkonzentrationen deutlich aufzeigen. Für die flugzeuggestützte In-situ-Treibhausgas-Konzentrationsmessung ist das internationale Projekt In-service Aircraft for a Global Observing System (IAGOS) etabliert. Fernerkundungsmessungen mit Spektrometern wie dem Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON) und dem Total Carbon Column Observing Network (TCCON) und u. a. auch dem flugzeuggestützten Methane Airborne Mapper (MAMAP) liefern Säulenkonzentrationen, ebenso flugzeuggestützte Lasergeräte (CH₄ Airborne Remote Monitoring, CHARM-F). Die Satellitenmessungen, darunter die Instrumente Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY), Orbiting Carbon Observatory (OCO) -2/-3, Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) -1/-2, Sentinel-5P und zukünftig Sentinel-5, Methane Remote Sensing Lidar Mission (MERLIN), Copernicus Car-

bon Dioxide Monitoring mission (CO2M) und andere, entwickeln sich hinsichtlich Qualität, Auflösung und Abdeckung immer weiter, sodass zukünftig Beiträge zur Bestimmung von Treibhausgasflüssen erwartet werden.



▲ Abb. 2.13-3: Atmosphärische Beobachtungssysteme für Treibhausgasemissionen (Quelle: Universität Bremen und DWD)

Erfassung der Treibhausgasflüsse

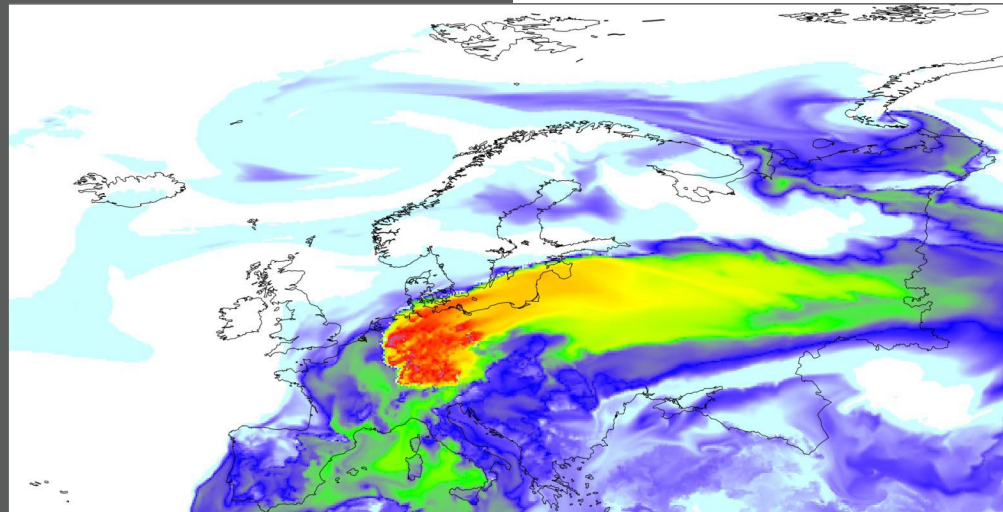
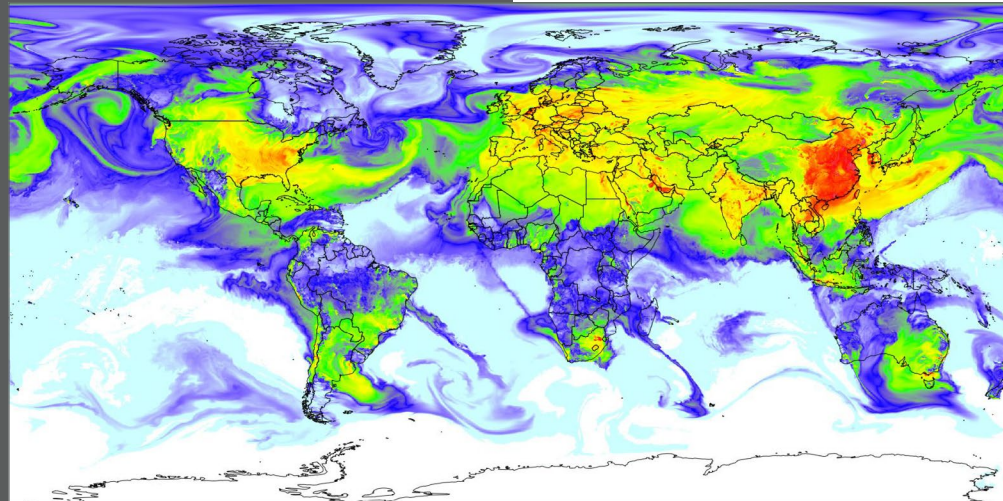
Treibhausgasflüsse werden mit nationalen und internationalen Beobachtungssystemen in der Atmosphäre gemessen (siehe Abb. 2.13-3). Zusätzlich werden ozeanische Flüsse erfasst. Aus den Messungen wird mithilfe von meteorologischer Transportmodellierung sowie mit mathematischen Verfahren der Datenassimilation und Inversion auf die Quellen und Senken rückgeschlossen. Bei den langlebigen Treibhausgasen müssen eine Vielzahl von Einflüssen über längere Zeitperioden angemessen berücksichtigt werden. Weil die gegenwärtigen Messungen nur Teilaspekte erfassen können, werden sogenannte A-priori-Informationen (d. h. mit anderen Methoden erstellte Abschätzungen der Quellen und Senken) miteinbezogen, was Schlüsse über die Plausibilität der verschiedenen Komponenten erlaubt. Die nationale ITMS-Initiative fokussiert auf Deutschland und nutzt die globalen Ergebnisse des Atmosphärenüberwachungsdienstes des Copernicus-Erdbeobachtungsprogramms der Europäischen Union (Copernicus Atmosphere Monitoring Service - CAMS) als Randbedingung.

Abb. 2.13-4: Das weltweit emittierte CO₂ wird mit der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation global verteilt. Das Beispiel zeigt für die Höhe der ICOS-Messstürme ein mit ICON-ART modelliertes Konzentrationsfeld, welches aus zehn Tagen Emissionen außerhalb Deutschlands resultiert. (Quelle: DWD) ▶

Gesetzliche Grundlagen

Mit dem Klimaabkommen von Paris wurde festgelegt, dass die Treibhausgasemissionen entsprechend nationaler Pläne, den »Nationally Determined Contributions«, reduziert werden sollen. Ab 2023 wird alle fünf Jahre der Fortschritt des Klimaschutzes in sogenannten Global Stocktakes erfasst. Zusätzlich sind ab 2024 alle zwei Jahre »Biennial Transparency Reports« vorgesehen.

Auf nationaler Ebene regelt das Bundes-Klimaschutzgesetz die zulässigen jährlichen Emissionsmengen für die einzelnen Sektoren wie z. B. Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr. Mit dem Urteil des Verfassungsgerichtes vom 24. März 2021 (Bundesverfassungsgericht 2021) wurden spezifischere Ziele und eine höhere Transparenz angemahnt, zu letzterer können diese GCOS ECVs durch Informationsgewinnung beitragen.



▲ Abb. 2.13-5: Die CO₂-Emissionen Deutschlands erhöhen die bodennahen CO₂-Konzentrationen über Europa, hier beispielhaft illustriert durch eine ICON-ART-Modellierung. (Quelle: DWD)

Internationale Einbettung

Fünf GCOS-Produkte sind für anthropogene Treibhausgasflüsse definiert:

1. Emissionen durch Nutzung fossiler Energieträger, Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft
2. Emissionen/Senken gemäß der vom IPCC verwendeten Landkategorien
3. Abschätzung der Flüsse durch inverse Modellierung - kontinental
4. Abschätzung der Flüsse durch inverse Modellierung - national
5. Hochaufgelöste CO₂-Säulenkonzentrationen zur Überwachung von Punktquellen

Die verschiedenen nationalen Initiativen sind im Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) international vernetzt.

Ressourcenbedarf

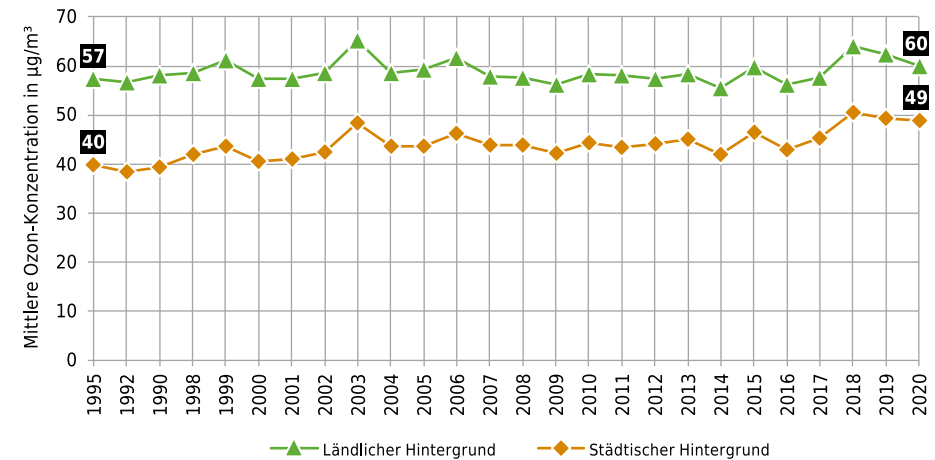
Der Aufbau der beobachtungsgestützten Emissionsverifikation in Deutschland wird durch die nationale Forschungsförderung für Nachhaltigkeit (FONA) mit dem Projekt Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem (ITMS) und durch verschiedene deutsche, europäische und internationale Forschungsprojekte unterstützt. Die Verstärkung des Engagements wird durch weitere Anschlussprojekte und Operationalisierung des resultierenden Systems durch die beteiligten Behörden und Institutionen langfristig sicherzustellen sein.

2.14 Ozon

Das farblose und giftige Gas Ozon ist eines der wichtigsten Spurengase in der Atmosphäre. In den Luftschichten oberhalb von 10 km (Stratosphäre) befindet sich mit über 90 % der Hauptteil dieses Gases. Die stratosphärische Ozonschicht schützt die Erde vor der schädlichen Ultraviolettstrahlung der Sonne. In den unteren Luftschichten der Atmosphäre gibt es eine sogenannte Ozon-Hintergrundbelastung, die vom hemisphärischen Transport und natürlichen Bildungsprozessen herrührt und hier vornehmlich betrachtet wird. Zusätzliches Ozon wird bei intensiver Sonneneinstrahlung durch photochemische Prozesse aus Vorläuferschadstoffen gebildet. Darüber hinaus ist Ozon ein Treibhausgas, trägt also zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei.



Trend der Ozon-Jahresmittelwerte von 1995 bis 2020

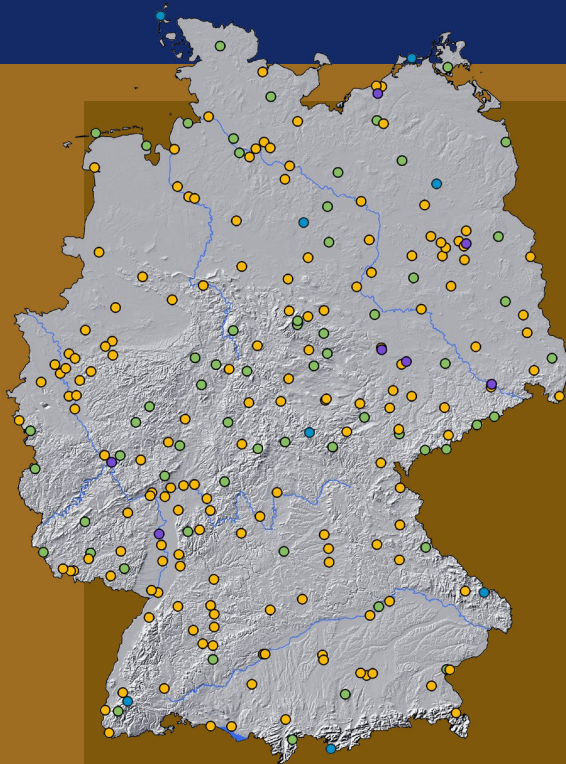


▲ Abb. 2.14-1: Entwicklung der Ozon-Jahresmittelwerte im Mittel über ausgewählte Messstationen im städtischen und ländlichen Hintergrund (Quelle: UBA mit Daten aus den Messnetzen der Länder und des UBA)

Klimasignale

Seit den 1990er-Jahren haben in bodennahen Luftmassen sowohl die Höhe der Ozonspitzenkonzentrationen als auch die Häufigkeit sehr hoher Ozonwerte deutlich abgenommen. Die zur Bekämpfung des sogenannten Sommersmog eingeleiteten Emissionsminderungsmaßnahmen haben sich als wirksam erwiesen. Verglichen mit dem Jahr 1990 sind die Emissionen der Ozonvorläuferstoffe Stickstoffoxide und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan in Deutschland bis zum Jahr 2019 um 60 % beziehungsweise 71 % zurückgegangen. Der Zielwert für den Schutz der menschlichen Gesund-

heit wird jedoch weiterhin überschritten. Im Unterschied zur Entwicklung der Spitzenwerte nahmen die Ozonjahresmittelwerte im Zeitraum von 1995 bis 2020 an Messstationen im städtischen Hintergrund – also in typischen Wohngebieten – zu. An Stationen im ländlichen Hintergrund ist kein signifikanter Anstieg der mittleren Ozonkonzentrationen nachweisbar (Abb. 2.14-1). Im Betrachtungszeitraum hat eine Verschiebung vom niedrigen zum mittleren Konzentrationswertebereich stattgefunden. Ursache hierfür ist die Minderung der Stickstoffoxidemissionen: Da Stickstoffoxid überwiegend als ■■■■



▲ Abb. 2.14-2: Karte der 2021 aktiven Ozonmessstationen: Blau markiert sind Stationen des UBA in ländlich abgelegenen Regionen, grün Stationen im ländlichen Bereich, gelb im städtischen Hintergrund und violett verkehrsnahen Stationen. (Quelle: UBA und Messnetze der Länder)

Messungen in Deutschland und im Ausland

Mitte der 1970er-Jahre begannen in Deutschland die ersten Messungen der bodennahen Ozonkonzentration. Im Jahr 1990 existierten bereits 194 Ozonmessstationen, verteilt über ganz Deutschland, 2020 wurde die Ozonkonzentration an 274 Standorten in Städten/Ballungsräumen und ländlichen Regionen gemessen. Für die Überwachung der Luftqualität nach Bundes-Immissionsschutzgesetz

sind in Deutschland die Bundesländer verantwortlich, die hierfür Messnetze betreiben. Zur Überwachung des weiträumigen, grenzüberschreitenden Transports von Luftverunreinigungen und zur Kontrolle der internationalen Aktivitäten und Luftreinhaltestrategien betreibt das Umweltbundesamt (UBA) ein eigenes Messnetz mit sieben Messstationen, die weitab von lokalen Schadstoffquellen liegen.

Das Ozon-Messprogramm des Deutschen Wetterdienstes an den Observatorien Hohenpeißenberg (MOHp) und Lindenberg (MOL)

Der Fokus der Ozonmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) liegt beim stratosphärischen Ozon und bei Messungen des Ozonprofils vom Boden bis zu 50 km Höhe. Die Messungen werden im Rahmen des Global Atmosphere Watch (GAW) Programme der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) durchgeführt, das speziell am MOHp auch umfangreiche bodennahe Messungen von Spurengasen und Aerosol umfasst. Für die Ozonprofil-Messungen werden seit Ende der 1960er-Jahre am MOHp und am MOL (in den ersten Jahren in Ost-Berlin) ein bis dreimal pro Woche regelmäßige Ozonsondierungen durchgeführt. Das Sondengespann steigt am Ballon bis in eine Höhe von mehr als 30 km auf und misst dabei fortwährend den Ozonpartialdruck, die Temperatur und den Wind, in der Troposphäre auch die Feuchte. Ebenfalls seit Ende der 1960er-Jahre werden die Ozon-Profilmessungen durch Messun-

gen der Ozon-Gesamtsäule mit Spektrometern komplettiert. An der Station Hohenpeißenberg wird seit Ende 1987 in klaren Nächten zusätzlich ein Laser-Radar-Gerät (LIDAR) zur Messung des Ozonprofils von 15 bis 50 km Höhe eingesetzt.

Die langen Ozonmessreihen der beiden Observatorien dokumentieren die Entwicklung des Ozons in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre. In der Stratosphäre zeigen sie deutlich die Ozonerstörung durch Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) von Ende der 1960er- bis Mitte der 1990er-Jahre. Seit Anfang der 2000er-Jahre erholt sich die Ozonschicht wieder. Allerdings ist dieser Prozess sehr langsam und wird noch einige Jahrzehnte dauern. Beim troposphärischen Ozon bestätigen die Daten von MOHp und MOL die sehr viel dichteren bodennahen Messungen des Umweltbundesamtes.

Die Hohenpeißenberger Ozonmessungen sind in das GAW-Programm der WMO eingebunden.

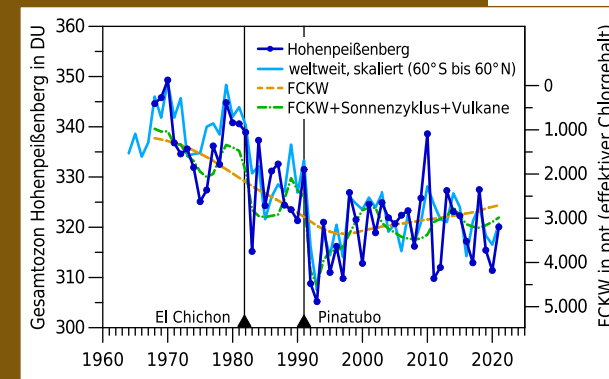


Abb. 2.14-3: Langjährige Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht anhand von Messungen der Ozon-Gesamtsäule an der Station Hohenpeißenberg sowie von weltweiten Daten (linke Skala). Die Daten zeigen eine deutliche Ozonabnahme von Ende der 1960er- bis Mitte der 1990er-Jahre und seither eine langsame Erholung. Die Ozonsäule folgt dabei der früheren Zunahme von ozonerstörenden FCKW und dem Rückgang dieser Stoffe infolge des internationalen Verbots durch das Montrealer Protokoll von 1987 (umgekehrte Skala rechts). Der 11-jährige Zyklus der Sonnenaktivität und große Vulkanausbrüche spielen ebenfalls eine Rolle. (Quelle: DWD)



Gesetzliche Grundlagen

Die Überwachung der Luftqualität – also auch der bodennahen Ozonkonzentration – erfolgt in Deutschland auf Basis von EU-Richtlinien zur Luftqualität, die mit einer Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (39. BImSchV) in deutsches Recht übernommen wurden. In dieser Verordnung sind zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Vegetation Zielwerte festgelegt. Um gesundheitliche Risiken für die Bevölkerung bei kurzfristiger Exposition gegenüber erhöhten Ozonkonzentrationen auszuschließen, gibt es zudem eine Informations- und eine Alarmschwelle.

Ressourcenbedarf

Aufgrund der gesetzlichen Verpflichtungen sind die Messungen der bodennahen Ozonkonzentration in Deutschland sowie die Ozonmessungen des DWD dauerhaft abgesichert.

Internationale Einbettung

Alle im Rahmen der europäischen Luftqualitätsrichtlinien in Deutschland erhobenen Ozondaten fließen in das Luftdatenportal der Europäischen Umweltagentur ein und stehen so für europaweite Untersuchungen, Statistiken und Projekte und auch als tagesaktuelle Daten zur Verfügung. Die Messstationen des UBA sind darüber hinaus Bestandteil des European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) zur Untersuchung der Schadstoffkonzentration in weiträumigen, grenzüberschreitend transportierten Luftmassen. Die Daten der Messstationen Zugspitze/Hohenpeißenberg (Globalstation), Schauinsland und Neuglobsow (Regionalstationen) tragen zudem zum GAW-Programm der WMO bei. Das MOHp betreibt in Kooperation mit dem Tschechischen Wetterdienst (CHMI, Czech Hydrometeorological Institute) das europäische Regional Dobson Calibration Center der WMO.

Die Ozonmessungen des DWD gehen neben GAW in weitere internationale Programme zur Überwachung der Atmosphäre und zur Validierung von Satellitendaten ein, wie z. B. in das Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) oder den Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

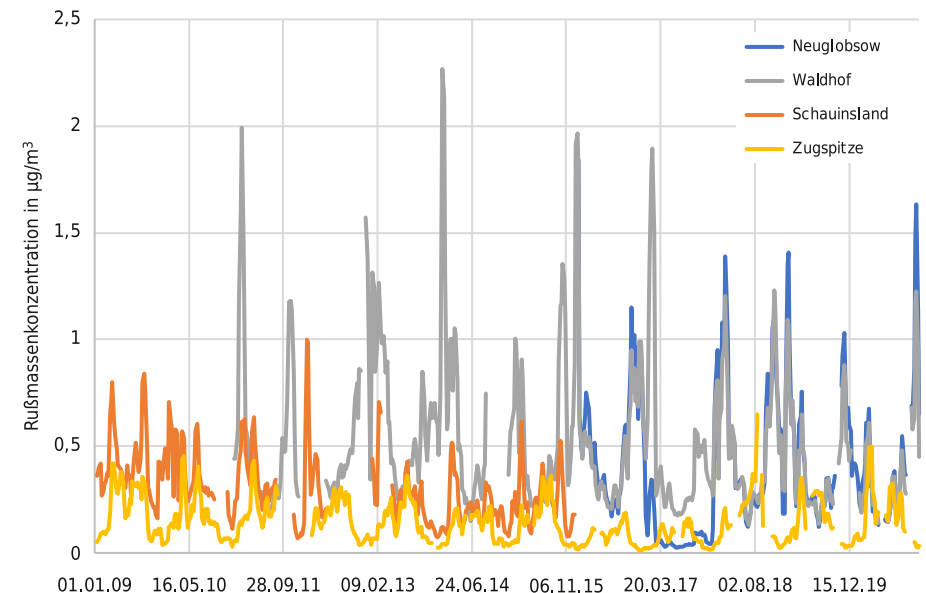
◀ Foto 2.14-1: Start einer ballongetragenen Ozonsonde am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg

2.15 Aerosole

Aerosole wirken auf das Klima überwiegend abkühlend. Ausgenommen davon ist schwarzer Kohlenstoff (BC, black carbon) bzw. Ruß, der aufgrund seiner strahlungsabsorbierenden Eigenschaften zu einer Erwärmung des Klimas beiträgt. Ruß entsteht größtenteils aus anthropogenen Verbrennungsprozessen. Die Wirkungsmechanismen der Aerosole im Allgemeinen sind jedoch noch nicht ausreichend verstanden, sodass entsprechende Messreihen zu ultrafeinen Partikeln (UFP) und Ruß von besonderer Bedeutung sind.



Rußmassenkonzentration in $\mu\text{g pro m}^3$



▲ Abb. 2.15.1: Rußmassenkonzentration in $\mu\text{g pro m}^3$ an Hintergrundstationen (Quelle: UBA)

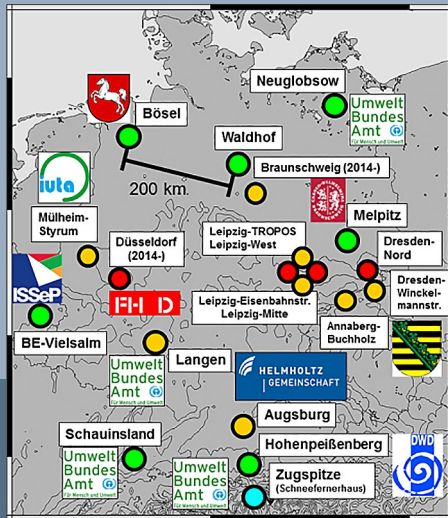
Klimasignale

Ähnlich zur Partikelmasse sieht man bei Ruß starke Abweichungen in den Messwerten städtischer und ländlicher Stationen. Eine wichtige bekannte Quelle für Ruß sind Verkehrsabgase (besonders von Dieselfahrzeugen), insofern lassen sich die hohen Werte an verkehrsnahen Stellen mit Mittelwerten um $2-4 \mu\text{g/m}^3$ im Zeitraum 2009–2011 erklären. An den Hintergrundstationen sind die Messwerte deutlich geringer. Hier liegen im selben Zeitraum die Rußkonzentrationen auf der Zugspitze beispielsweise bei relativ konstanten $0,02 \mu\text{g/m}^3$. Ruß erweist sich also, analog zur Anzahl ultrafeiner Partikel, als empfindlicher Indikator für

den Einfluss lokaler Verbrennungsquellen auf einen bestimmten Messpunkt.

Analog zur Partikelmasse wird auch bei Ruß ein starker Jahresgang beobachtet. Im Flachland treten im Winter die höchsten Messwerte auf, an den Bergstationen aber im Sommer. Dies ist in den jahreszeitlichen Schwankungen der Mischungsschichthöhe und der winterlichen Heizperiode begründet (Sun et al. 2021).

Ausgehend vom Jahr 2009 zeigte sich in den folgenden Jahren bis 2018 eine landesweite Verringerung der Rußkonzentration um $1,7\% - 13,1\%$ im jährlichen Trend. Die Verringerung der gemessenen Rußkonzentrationen ■ ■ ■



◀ Abb. 2.15-2: Lage der 19 Messstationen im Deutschen Messnetz für Ultrafeinstaub (GUAN, siehe Link am Ende des Beitrags). Die Farben charakterisieren die Lage der Messstationen (rot: verkehrsbezogen; orange: städtisch; grün: ländlich und hellblau: alpin). (Quelle: UBA)

Messungen in Deutschland

Die Rußkonzentration (BC) wird neben den Partikelgrößenverteilungen zur Bestimmung von ultrafeinen Partikeln (UFP) und der Aerosolchemie in Deutschland u. a. an 19 Standorten im Rahmen des German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) seit Oktober 2008 kontinuierlich gemessen. Das GUAN-Messnetz wurde vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Bestimmung der repräsentativen Exposition der Bevölke-

rung mit Fein- und Ultrafeinstaub aufgebaut. Darüber hinaus gibt es zahlreiche BC-Messungen durch die Messnetze der Bundesländer. Zusätzlich zu den BC-Messungen werden in Deutschland durch die GAW-Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg auf der Zugspitze und dem Hohen Peißenberg Nephelometermessungen durchgeführt. Hierbei handelt es sich um kontinuierliche Messungen der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung von Aerosolen auf drei Wellenlängen. Die Daten dienen auch der Bestimmung der Einfachstreuabedo, mit der Transportereignisse von Vulkanstaub und Sahara-aerosol bestimmt werden können. Elementarer Kohlenstoff und organischer Kohlenstoff werden vom Umweltbundesamt in Deutschland seit Juni 2011 an den

zeigt dabei eine gute Übereinstimmung mit der Verringerung der gesamten BC-Emissionen und somit den Erfolg von gesetzlichen Verminderungsmaßnahmen, wie emissionsärmere Verkehrs- und Heizsysteme. Zudem zeigt sich aufgrund der reduzierten Verkehrsemissionen im Tagesverlauf der Rußkonzentrationen im städtischen Bereich ein Rückgang während der Tagesstunden. Im saisonalen Trend hat in den Wintermonaten die häusliche Heizung einen größeren Effekt auf die Rußkonzentrationen (Sun et al. 2020).

Gesetzliche Grundlagen

Durch die Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa wurden die bisherige Luftqualitätsrahmenrichtlinie (Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität) und drei »Tochterrichtlinien« (Richtlinien 1999/30/EG, 2000/69/EG und 2002/3/EG) ersetzt, in denen bereits Grenzwerte zu SO₂, NO₂, NO_x und PM₁₀ sowie weiteren gasförmigen Luftschadstoffen festgelegt worden waren. Somit bestehen EU-weit bisher keine Richtlinien, die Grenzwerte für klimawirksame Aerosole, wie beispielsweise den kurzlebigen schwarzen Kohlenstoff, vorschreiben. Allein für PM₁₀ und PM_{2,5} bestehen Grenzwerte, wobei festgestellt werden muss, dass für diese Aerosolform bisher kein evidenter Zusammenhang mit der Temperaturentwicklung bekannt ist (Kuttler 2011).

GAW-Regionalstationen Schauinsland und Neuglobsow sowie an den UBA-Messstationen Schmücke und Waldhof gemessen. PM₁₀- und PM_{2,5}-Konzentrationen der Umgebungsluft werden in Deutschland an den drei GAW-Messstationen Neuglobsow, Schauinsland und Zugspitze sowie an allen weiteren Messstationen des Luftmessnetzes des Umweltbundesamtes in Westerland, Zingst, Waldhof und Schmücke gemessen. Weiterhin werden PM₁₀ und PM_{2,5} in den Luftmessnetzen der Bundesländer zur Überwachung der Luftqualität an über 370 Stationen gemessen, die zumeist in dichter besiedelten Gebieten oder in Ballungsräumen liegen.



Internationale Einbettung

Das GUAN-Messnetz ist Teil der sich weiterentwickelnden europäischen Messprogramme und -projekte wie EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research) und ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure). GUAN-Daten können von der Datenbank EBAS (Database of atmospheric chemical composition and physical properties) des Norwegischen Instituts für Luftforschung NILU unter Berücksichtigung der vorgegebenen Richtlinien abgerufen werden (siehe Link unten).

Ressourcenbedarf

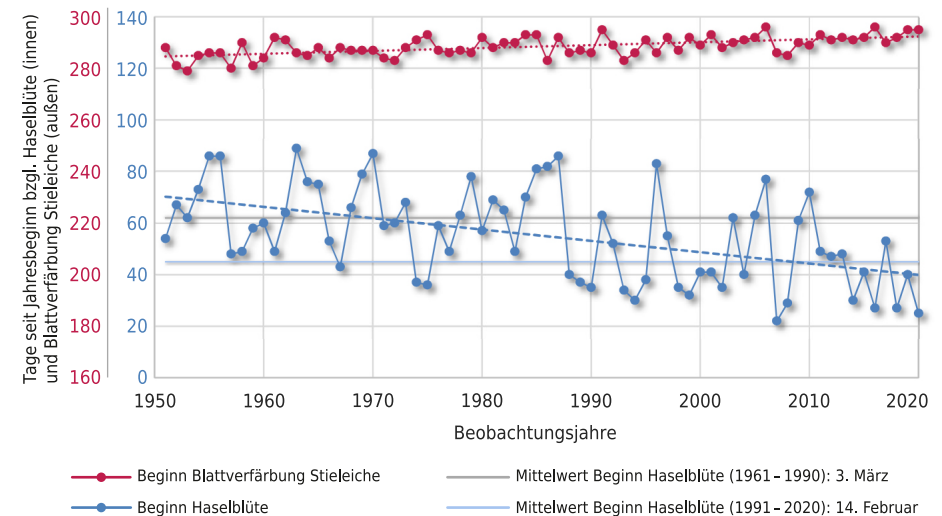
Das GUAN-Messnetz wurde im Zeitraum von 2008 bis Ende 2013 vom Bundesumweltministerium finanziell gefördert. Das Netzwerk wird zurzeit, soweit möglich, jeweils selbstfinanziert durch die Stationsbetreiber, weiterhin betrieben. Somit ist jedoch eine langfristige Messung nicht gesichert, aber insbesondere durch das steigende Interesse an BC- und UFP-Messungen wäre dies notwendig und sinnvoll. Die bestehenden Nephelometermessungen sind durch das Umweltbundesamt, den DWD und die Messung von PM10 und PM2,5 durch die Bundesländer hingegen dauerhaft finanziert.

2.16 Pollen

Rund 20 Millionen Menschen in Deutschland leiden an Pollenallergien – das ist gut ein Viertel der Bevölkerung. Tendenz: steigend. Pollenproduktion und -freisetzung bei Pflanzen werden ganz entscheidend vom Wetter in seiner komplexen Form beeinflusst. Durch langjährige kontinuierliche Bestimmung der atmosphärischen Pollenkonzentrationen und Modellrechnungen zum Pollenflug können mögliche Verschiebungen der Pollensaison, Änderungen in der Pollenmenge sowie das Auftreten neuer Pollenarten erfasst werden.



Beginn der Haselblüte und Blattverfärbung der Stieleiche in Deutschland seit 1951



▲ **Abb. 2.16-1:** Blühbeginn Hasel und Blattverfärbung Stieleiche seit 1951 als Indikatoren für Start und Ende der Vegetationsperiode. Mit der verlängerten Vegetationsperiode geht auch ein verlängerter Zeitraum des Pollenfluges einher. (Quelle: DWD)

◀ **Foto 2.16-1:** Männliche Blütenstände der Hasel

Klimasignale

Bedingt durch den Klimawandel verlängert sich die Vegetationsperiode und damit potenziell auch die Zeit des Pollenflugs. Als Indikator wird hierfür die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Blüte von Hasel (Vorfrühling) und der Blattverfärbung der Stieleiche (Spätherbst) herangezogen: In Deutschland hat sich demnach die Vegetationsperiode zwischen 1961-1990 und 1991-2020 im Mittel um drei Wochen verlängert (Abb. 2.16-1). Dabei treten die größten Veränderungen im Frühjahr auf.

Neben einer Verfrühung der Pollensaison zeichnet sich bei einigen Pollenarten (z. B. Hasel, Birke, Ambrosia) auch eine Zunahme der Pollenkonzentration ab. Hierfür verantwortlich sind mitunter der Anstieg der CO₂-Konzentration und der Temperatur (Kaminski und Glod 2011, Augustin et al. 2017).

Des Weiteren führt die globale Erwärmung zu einer Verschiebung der Vegetationszonen und verändert das Pflanzenspektrum. Während kälteangepasste Pflanzen ihren Lebensraum verlieren könnten, werden sich wärme-

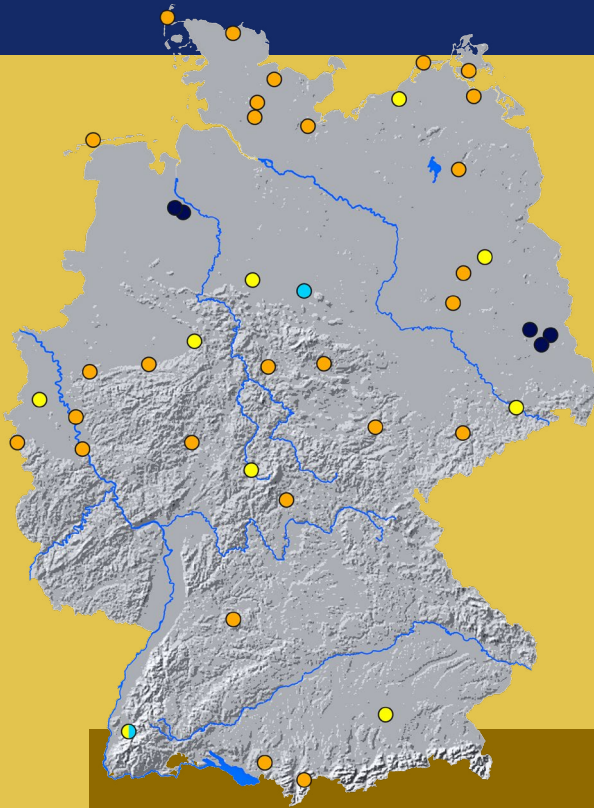


Foto 2.16-2: Ambrosia - eine stark allergene Pflanze ▶

◀ Abb. 2.16-2: Das Messnetz des Deutschen Polleninformationsdienstes PID. Der DWD (hellblau) betreibt eine Pollenmessstelle am ZAMF in Braunschweig und eine der Referenzstationen (gelb) innerhalb des PID-Messnetzes am ZMMF in Freiburg und erstellt hier die Pollenflugvorhersagen. Saisonale (orange) und kooperierende (dunkelblau) Stationen ergänzen das Messnetz. (Quelle: DWD)



Messungen in Deutschland

Seit Mitte der 1980er-Jahre wird die Konzentration wichtiger luftgetragener Pollen in Deutschland erfasst. Derzeit umfasst das Messnetz der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst ca. 35 Stationen. An 10 sogenannten Referenzmessstellen erfolgt die Pollenanalyse ganzjährig. Alle Messstellen sind mit Hirst-Fallen ausgerüstet; die Arbeitsrichtlinien für die Präparation und Auswertung der Proben sind für alle Stationen einheitlich. Seit 1986 veröffentlicht der DWD eine deutschlandweite Pollenflugvorhersage. Sie bezieht sich aktuell auf die acht allergologisch wichtigsten Blü-

tenpollen von Hasel, Erle, Esche, Birke, Süßgräsern, Roggen, Beifuß und Ambrosia. Die Pollenflugvorhersage beginnt mit dem ersten Auftreten von Hasel- und Erlenpollen, i. d. R. im Januar - je nach Witterung auch manchmal im Dezember. Sie endet etwa Mitte Oktober nach dem Flug der Ambrosiapollen. Die Vorhersage ist über Webseite, Newsletter, GesundheitsWetter-App oder Opendata-Server des DWD verfügbar.

Mittlerweile gibt es verschiedene Messsysteme zur automatischen Pollenerfassung auf dem Markt. Der Freistaat Bayern betreibt ein Messnetz bestehend aus acht Pollenmonitoren. Der DWD prüft derzeit die auf dem Markt verfügbaren Systeme auf ihre operationelle Eignung.



liebende Pflanzen wahrscheinlich weiter ausbreiten, wie z. B. die hochallergene Ambrosia, die in einigen Regionen Deutschlands bereits etabliert ist (Cunze et al. 2013, Lake et al. 2017). Aber auch Pflanzen wie Olive, Glaskraut oder Zypresse, die im Mittelmeerraum mit zu den Hauptauslösern von Allergien gehören, könnten zukünftig stärker in den Fokus rücken. Deshalb ist eine kontinuierliche Überwachung des Pollenvorkommens äußerst wichtig.

Gesetzliche Grundlagen

Nach § 4 des DWD-Gesetzes gehört zu den Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes die Erbringung meteorologischer Dienstleistungen für die Allgemeinheit oder einzelne Kunden und Nutzer auf dem Gebiet des Gesundheitswesens. Neben eigenen Pollenmessungen kauft der DWD Daten von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) und weiteren Anbietern. Basierend auf Pollen-, meteorologischen und phänologischen Daten sowie numerischen Pollenprognosen (ICON-ART) wird am Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung des DWD (ZMMF) in Freiburg täglich die Pollenflugvorhersage erstellt.



Internationale Einbettung

Die Pollenausbreitung ist nicht an nationale Grenzen gebunden und erfordert einen internationalen Datenaustausch. Zu diesem Zweck ist 1988 die Datenbank des European Aeroallergen Network (EAN) erstellt worden. Die EAN-Datenbank enthält Pollenflugdaten von mehr als 400 aktiven und 300 historischen Pollenmessstationen aus Europa, die der Forschung zur Verfügung stehen. Sie liefert damit wertvolle Informationen über die räumliche und zeitliche Entwicklung des Pollengehaltes der Luft über Europa.

Im EUMETNET-Programm AutoPollen wird das Ziel verfolgt, internationale Standards und Mindestanforderungen an die automatische Pollenerfassung sowie Standortbedingungen festzulegen, um eine internationale Vergleichbarkeit der Pollenflugdaten zu gewährleisten. An diesem Programm wirkt der DWD aktiv mit.

Ressourcenbedarf

Der DWD betreibt zwei Pollenmessstationen, eine davon am ZMMF Freiburg, die auch als Referenzstation im Messnetz des PID ganzjährig Pollenkonzentrationen bestimmt und die Daten unentgeltlich an den PID abgibt. Eine weitere Station befindet sich am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) des DWD in Braunschweig. Die überwiegende Zahl der manuellen Pollenmessstellen ist im Bereich medizinischer Einrichtungen angesiedelt. Der ausfallsichere Betrieb dieser Messstellen wie auch die Datenqualität hängt von externen Randbedingungen ab, die schwer zu beeinflussen sind. Aufgrund der hohen Relevanz der Pollenmessungen wäre ein Messnetz mit einer Grundfinanzierung sinnvoll, die kontinuierliche Messungen auf einem hohen Qualitätsniveau sicherstellt. Allerdings erfordert die manuelle Auswertung einen hohen Personaleinsatz. Deshalb strebt der DWD den Aufbau eines deutschlandweiten, automatischen Pollenmessnetzes an, sobald geeignete Geräte kommerziell erhältlich sind.

◀ Foto 2.16-3: Wechsel der Trommel aus der Pollenfalle für die Pollenauswertung auf dem Dach der DWD-Niederlassung in Freiburg im Breisgau

3 Ozeanische Beobachtungen

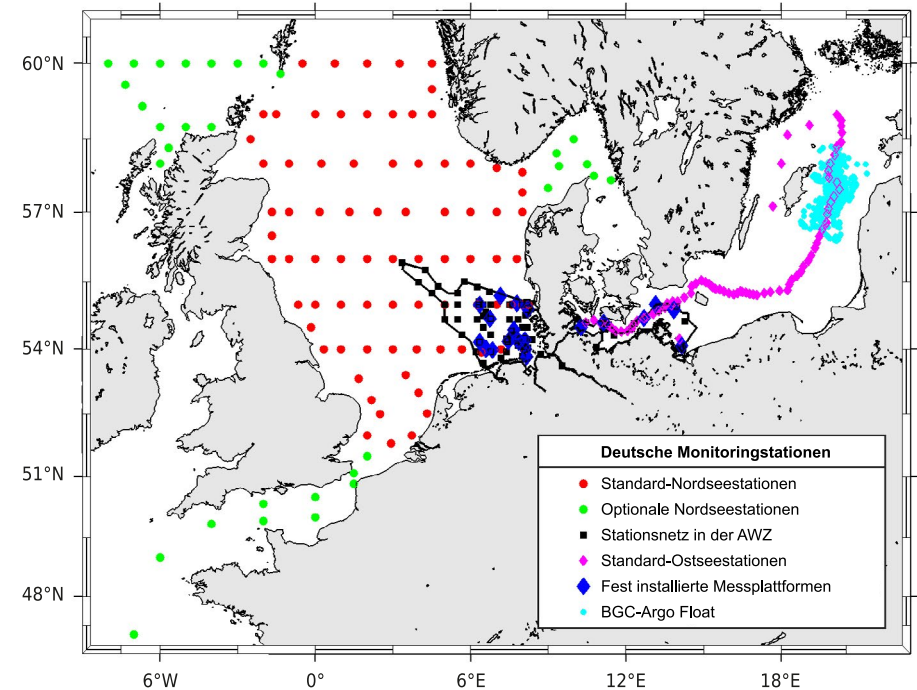


3.0 Auswirkungen der weltweiten Erwärmung auf den Ozean

Die Ozeane und Küstengewässer sind wichtige Komponenten im Klimasystem der Erde. So wurde etwa 90 % der zusätzlichen Wärme, die durch die anthropogene Verstärkung des Treibhauseffektes entstanden ist, vom Ozean aufgenommen. Der Klimawandel ist in den Küstenbereichen für uns Menschen direkt zu beobachten, etwa beim Meeresspiegelanstieg, der Ozeanversauerung und den Veränderungen der küstennahen Ökosysteme. Deutsche Klimabeobachtungen im Rahmen des Global Climate Observing System (GCOS) werden in der Nord- und Ostsee (mit Fokus auf die deutsche Ausschließliche Wirtschaftszone, AWZ) und auch im offenen Ozean durchgeführt.



Deutsche Monitoringstationen in Nord- und Ostsee

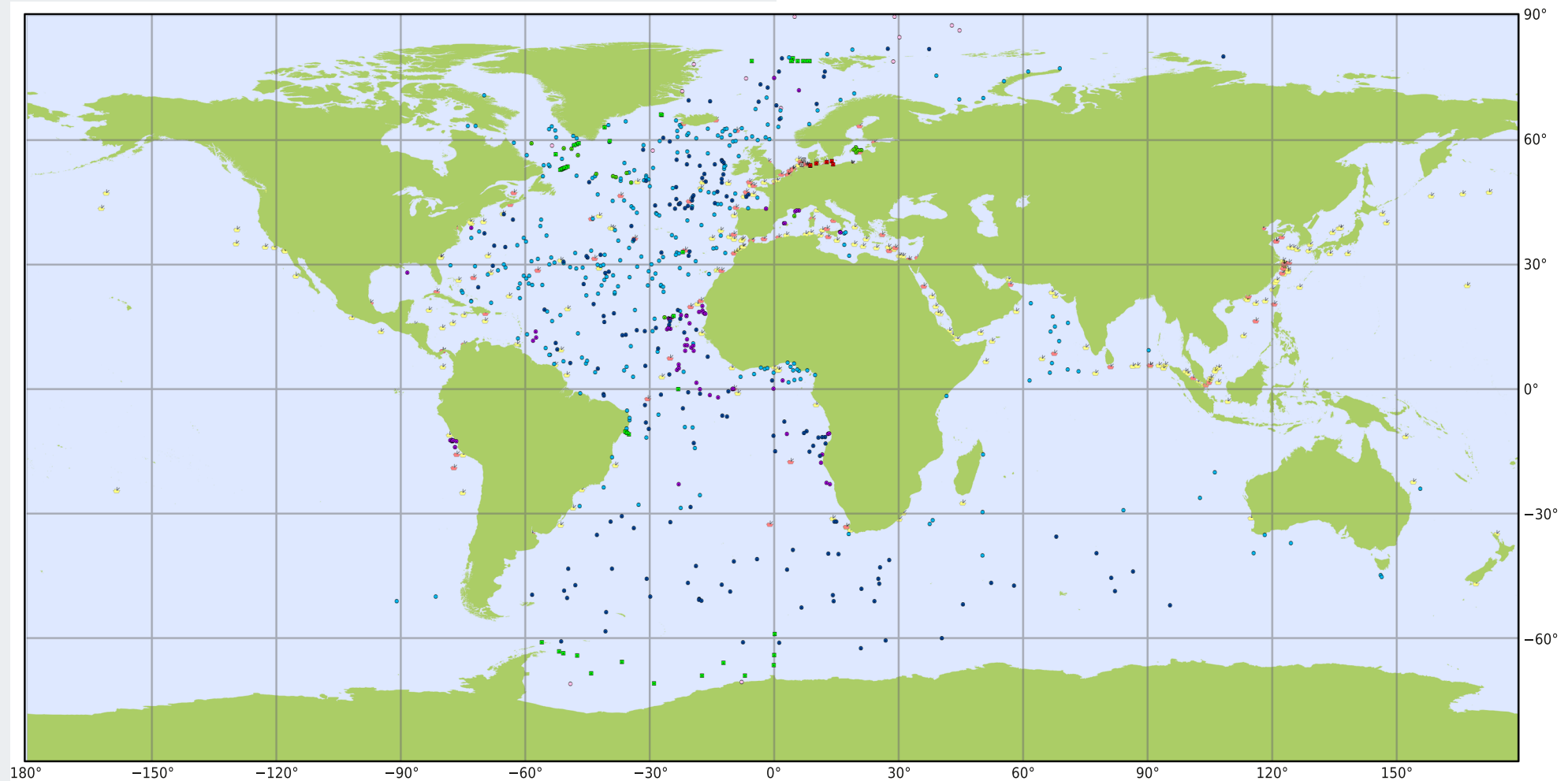


▲ Abb. 3.0-1: Regelmäßig beprobte Stationen in Nord- und Ostsee. Kreise markieren jährlich beprobte Stationen (rot) sowie Stationen, die in größeren zeitlichen Abständen ebenfalls angefahren werden (grün). Das Stationsnetz in der deutschen AWZ (gekennzeichnet durch die schwarze Linie) wird bis zu fünfmal im Jahr bedient (schwarz) und in der Ostsee durch weitere Monitoringstationen ergänzt (magenta). Weitere Informationen zu biogeochemischen Parametern liefert in der Ostsee ein Argo Float (cyan). Fest installierte Messplattformen wie die Forschungsplattformen in der Nordsee (FINO-Stationen) oder die Messbojen des Marinen Umweltmessnetzes in Nord- und Ostsee (MARNET) sind durch blaue Rauten markiert. Hier werden Zeitreihen hydrographischer und chemischer Parameter aufgezeichnet und der Seegang erfasst. Nicht alle Parameter werden an allen Stationen erhoben. (Quelle: BSH)

Abdeckung, Nachhaltigkeit und Einbettung in das GCOS

In Nord- und Ostsee werden Langzeitbeobachtungen als Monitoringprogramme größtenteils durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt, in der Ostsee unterstützt das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde

(IOW) das Monitoringprogramm und deckt große Teile davon ab (Abb. 3.0-1). In enger Kooperation mit universitären und außeruniversitären Forschungsinstituten wird die räumliche Messabdeckung und das Spektrum der beobachteten Variablen erweitert. ■ ■ ■



Globales Ozeanbeobachtungssystem (Global Ocean Observing System, GOOS)

September 2021

Von Deutschland betriebene, durch OceanOps überwachte In-situ-Beobachtungsplattformen

Mobile Systeme

- Tauchbojen - Argo Floats (195)
- Tauchbojen für biogeochemische Messungen - BGC-Argo Floats (17)
- Unterwassergleiter - OceanGliders (109)
- Driftbojen - DBCP (290)
- Polarbojen - DBCP (14)

Ortsfeste Systeme

- Offshore-Plattformen - DBCP (2)
- Fest verankerte Bojen - DBCP (5)
- Ozeanische Referenzstationen - OceanSITES (45)
- Meeresspiegelstationen - GLOSS (1)

Schiffsbasierte Messungen

- 🚢 Mit Personal besetzte Bordwetterwarten - SOT/VOS (187)
- 🚢 Automatische Bordwetterstationen - SOT/VOS (111)



Erstellt durch ocean-ops.org, 2021-09-28
 Projektion: World Plate Carree

▲ Abb. 3.0-2: Auslegepositionen von deutschen Messplattformen, die in der Datenbank des GOOS registriert sind. Argo-Tiefendrifter gibt es in der Standardausführung für Temperatur- und Salzgehaltsmessungen (blaue Punkte) sowie als erweiterte Plattformen mit biogeochemischen Sensoren (grün). Oberflächendrifter sind blau und rosa gekennzeichnet. Verankerungen (grüne Quadrate) und fest installierte Bojen und Plattformen (rote und graue Quadrate) sind Teil der deutschen Aktivitäten, ebenso Missionen mit Unterwassergleitern (lila Punkte). (Quelle: DWD nach OceanOPS)



Weiterhin betreibt zum Beispiel der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) eine Seegangsmessstation in der Nordsee bei Sylt, und die Station Bunkerhill wird durch das Helmholtz-Zentrum Hereon bedient.

Die Beobachtungen in der AWZ sind eingebettet in europäische Initiativen und tragen auch zur Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) bei.

Die Beobachtungen im offenen Ozean werden größtenteils über Forschungsprojekte aufrechterhalten. Eine Ausnahme ist der durch das BSH/BMDV dauerhaft finanzierte deutsche Beitrag zum Argo-Tiefendrifter-Array.

Unabhängig von der Art und Dauer der Finanzierung der Beobachtungsaktivitäten ist es notwendig, dass die Verfügbarkeit der Daten für GCOS sichergestellt ist. Datensätze werden national im Datenzentrum PANGAEA® und im Deutschen Ozeanographischen Datenzentrum (DOD) gesammelt, die sich mit europäischen Datenportalen wie SeaDataNet, EMODnet, Copernicus

Climate Change Service (C3S) und Copernicus Marine Service (CMEMS) austauschen.

Über die einzelnen Koordinationsgruppen des globalen Ozeanbeobachtungssystems (Global Ocean Observing System, GOOS) kann die Vernetzung und Kontinuität aller notwendigen Datenquellen abgestimmt werden, was dann die Verbindung mit dem Klimabeobachtungssystem der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), dem WMO Integrated Global Observing System (WIGOS), sicherstellt. Diese Koordinationsgruppen umfassen die Betreiber der Beobachtungsplattformen (Schiffe, autonome driftende und navigierende Systeme, verankerte Systeme, siehe Abb. 3.0-2). Eine Übersicht der Beiträge der beteiligten Nationen zum GOOS und auch zu GCOS kann über ein Webportal (ocean-ops.org) abgegriffen werden, das auch als Grundlage für die jährlich erscheinende Berichtskarte (Ocean Observing System Report Card) des GOOS verwendet wird.

◀ Foto 3.0-1: Deck der FS METEOR bei Vorbereitungen zur Auslegung einer Zeitserienstation im Nordatlantik

bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Ozeanographisches_Datenzentrum/ozeanographisches_datenzentrum_node.html

pangaea.de

emodnet.ec.europa.eu

seadatanet.org

climate.copernicus.eu

marine.copernicus.eu

3

Ozeanische Beobachtungen



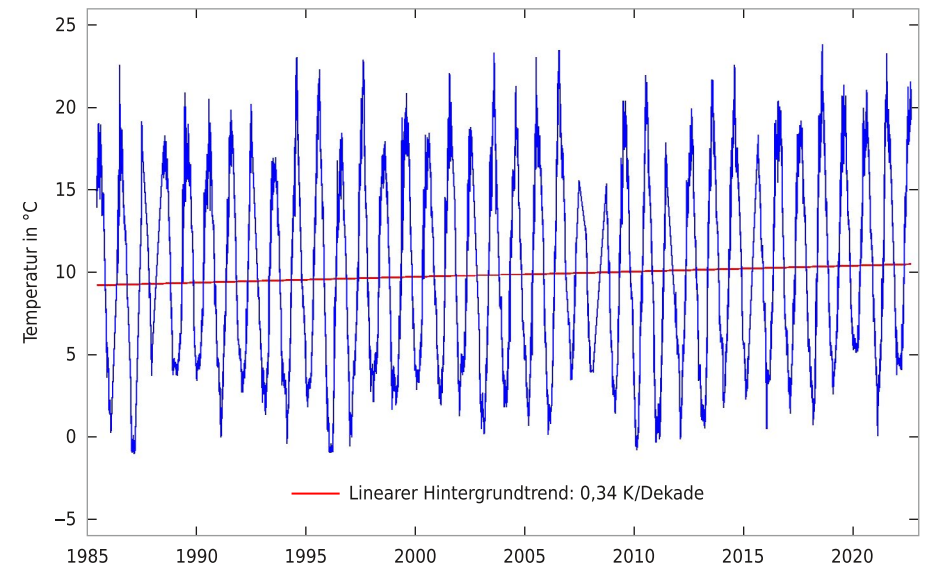
Ozeanphysik

3.1 Ozeanoberflächen- temperatur

Die Temperatur der Meeresoberfläche wird lokal durch latente und sensible Wärmeflüsse, Vermischungsprozesse und die Strahlungsbilanz bestimmt. Durch großräumige Strömungen kann es zu horizontaler und vertikaler Advektion kommen. Meistens befindet sich die Meeresoberfläche jedoch nahezu im thermischen Gleichgewicht mit der angrenzenden Atmosphärenschicht und spiegelt so den jahreszeitlichen Wechsel der Temperatur wider. Dies ermöglicht die Abschätzung des Temperaturklimas und dessen Änderungen.



Oberflächentemperatur 1985-2022 an der MARNET-Station LT Kiel in 1 m Tiefe



▲ Abb. 3.1-1: Zeitreihe der Oberflächentemperatur vom 20.06.1985 bis 31.08.2022 in 1 m Tiefe an der MARNET-Station LT Kiel mit angepasstem linearem Hintergrundtrend von 0,34 K/Dekade. In 0,5 m, 2 m und 4 m Tiefe betragen die angepassten Trends der entsprechenden Zeitreihen an dieser Station 0,35 K/Dekade, 0,35 K/Dekade bzw. 0,30 K/Dekade. (Quelle: BSH)

◀ Foto 3.1-1: Ein Oberflächendrifter startet seine meist mehrjährige Mission, bei der Luft- und Wassertemperatur, Luftdruck und Strömungen gemessen und per Satellit an Land übermittelt werden.

Klimasignale

Die Oberflächentemperatur wird, je nach zeitlicher Auflösung, neben ihrem Tagesgang hauptsächlich von ihrem Jahresgang dominiert (siehe Abb. 3.1-1). Diese natürlichen periodischen Schwankungen überlagern die deutlich kleineren klimatischen Veränderungen, die systematisch zu höheren Temperaturen führen. Im einfachsten Fall wird ein linearer Hintergrundtrend angenommen. Für die gesamte Nordsee werden hierfür +0,3 K/Dekade in der Zeit von 1969

bis 2008 angegeben (Löwe 2009). In der Deutschen Bucht wird der Anstieg im Zeitraum von 1983 bis 2012 mit +0,4 bis +0,5 K/Dekade beziffert (Quante und Colijn 2016). Die gesamte Ostsee zeigt im Zeitraum von 1990 bis 2018 in Satellitendaten einen Trend von +0,59 K/Dekade (Siegel und Gerth 2019). Im Bereich der süd-westlichen Ostsee werden für die Erwärmung in der Zeit von 1990 bis 2008 Werte um +0,7 K/Dekade angegeben (Lehmann ■■■



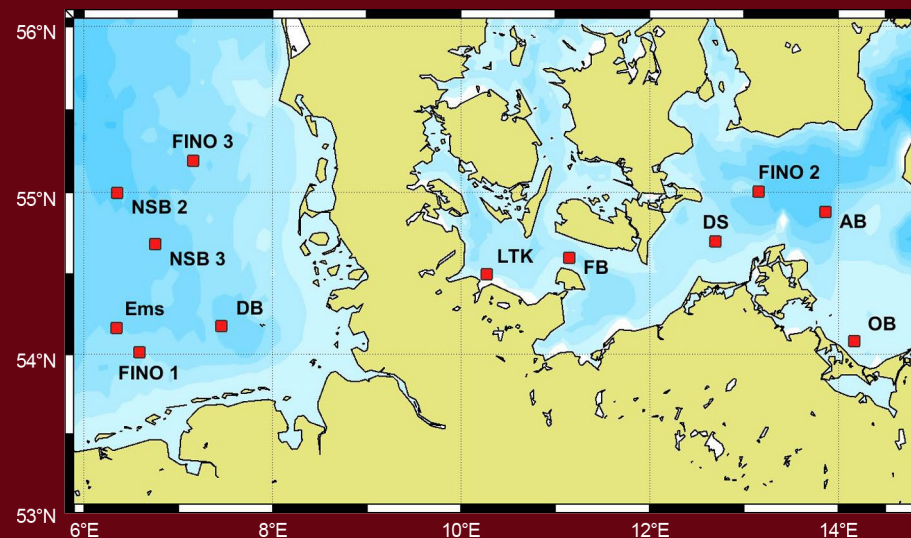
et al. 2011). Die angegebenen Werte hängen aber neben der Region und der Methode vor allem auch immer sensibel vom betrachteten Zeitraum ab, da der Temperaturanstieg nicht gleichförmig erfolgt, und sind daher nicht in jedem Fall direkt vergleichbar. So wird z. B. in der süd-westlichen Ostsee für den Zeitraum von 1856 bis 2005 ein linearer Trend von +0,06 K/Dekade gefunden und aus demselben Datensatz mit derselben Methode im Zeitraum von 1978 bis 2007 ein etwa zehnmal so großer mit dem zuvor angegebenen Wert vergleichbarer Trend ermittelt (Kniebusch et al. 2019). Daher ist die Annahme eines linearen Hintergrundtrends eine grobe Vereinfachung, die lediglich einen mittleren Temperaturanstieg im betrachteten Zeitraum beschreibt, dafür aber bei geeigneter Wahl des Referenzzeitraumes durch Extrapolation eine einfache Vorhersage der Entwicklung in der näheren Zukunft erlaubt.

Wo wird gemessen?

Messungen der Meeresoberflächentemperatur in den deutschen Küstengewässern werden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und auf Landesebene von den Landesämtern aufgrund ihrer gesetzlichen Aufgaben durchgeführt. Im Hinblick auf Klimauntersuchungen sind beim BSH an erster Stelle die oberflächennahen Messungen an den stationären Messplattformen des Marinen Umweltmessnetzes in Nord- und Ostsee (MARNET) zu nennen (siehe Abb. 3.1-2), da sie ortsfeste Zeitreihen mit hoher Auflösung generieren, die zu diesem Zweck

besonders geeignet sind. Auch die Landesämter führen regelmäßig ortsfeste Beprobungen durch, allerdings meist mit deutlich geringerer und somit weniger repräsentativer zeitlicher Auflösung. Neben den Stationsdaten liefert das BSH auch Datensätze der Oberflächentemperatur aus schiffsgebundenen Messungen, die während der regelmäßigen Umweltüberwachungsfahrten drei- bis viermal jährlich an festen Beprobungsorten und mithilfe von Durchflussmessungen auf den Strecken dazwischen erhoben werden. Daneben liefern auch Forschungseinrichtungen Datensätze der Oberflächentemperatur. Hier sind vor allem

Ferrybox-Daten zu nennen, die auf Schiffen der Berufsschifffahrt auf nahezu identischen Strecken regelmäßig erhoben werden. Auch die Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger (DGzRS) meldet von ihren besetzten Küstenstationen täglich Oberflächentemperaturen. Weitere wichtige Datenquellen sind die von der Voluntary-Observing-Ship(VOS)-Flotte der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) gemeldeten und über das Global Telecommunication System (GTS), das ebenfalls von der WMO betrieben wird, verbreiteten Oberflächentemperaturen sowie Satellitenmessungen, z. B. von den NOAA-Satelliten. Diese beiden Datenquellen werden u. a. auch zur Produktion der wöchentlichen Meeresoberflächentemperaturkarten des BSH verwendet, allerdings entspringen sie keinem exklusiv deutschen Messprogramm.



◀ Abb. 3.1-2: Die Messstationen des MARNET in Nord- und Ostsee. FINO 1 bis 3 steht für die drei Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee, NSB 2 und 3 für die zwei betriebenen Nordseebojen, Ems und DB für die beiden Feuerschiffe Ems und Deutsche Bucht, LTK für die Messstation LT Kiel am Leuchtturm Kiel und FB, DS, AB und OB für die Messstationen im Fehmarnbelt, an der Darßer Schwellen, im Arkona-Becken und auf der Oderbank. (Quelle: BSH)

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Wesentliche Teile der erhobenen Meeressoberflächentemperaturdaten werden vom North West Shelf Operational Oceanographic System (NOOS) und vom Baltic Operational Oceanographic System (BOOS) gesammelt und weiterverbreitet. Da diese operationellen Systeme regionale Allianzen (Regional Operational Oceanographic Systems, ROOS) sowohl von der Europäischen Komponente des Global Ocean Observing System (EuroGOOS) einerseits als auch andererseits direkt von GOOS selbst darstellen, besteht hier eine mittelbare Vernetzung mit GCOS. Durch ihre Verfügbarkeit beim Copernicus Marine Service (CMEMS) fließen die Daten u. a. in die Arbeiten der European Environment Agency (EEA) und in Berichte auf Grundlage der europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie ein, soweit dies nicht bereits auf direktem Weg erfolgt. Im Rahmen der Verpflichtungen als Vertragspartner werden die Daten von entsprechenden Monitoringpositionen in der Nord- bzw. Ostsee auch an die OSPAR Commission und die Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission bzw. HELCOM) geliefert und von diesen in deren Umweltzustandsbewertungen verwendet. Auf globaler Ebene fließen insbesondere die über GTS verbreiteten Meerestemperaturmessungen in klimarelevante Datensätze wie dem International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) ein.

Die Meerestemperaturmessungen des BSH und der Landesämter als staatliche Stellen sind nach der Open-Data-Richtlinie der Europäischen Union (EU) frei zugänglich. Sie fließen direkt in staatliche Datenportale wie die Geodateninfrastruktur (GDI) des BSH als meeresbezogener Teil der bundesweiten Geodateninfrastruktur GDI-DE, die wiederum eine Komponente des gemeinsamen EU-Geoportals (Infrastructure for Spatial Information in Europe, INSPIRE) ist. Einige Daten, insbesondere die Stationsdaten des MARNET, werden daneben auch über NOOS und BOOS operationell gesammelt und finden auf diesem Weg Eingang in die europäischen Datenportale des CMEMS, des European Marine Observation and Data Network (EMODnet) und des Sea-DataNet. Auch die über das GTS verbreiteten Daten sind frei zugänglich und werden weltweit vielseitig genutzt. Insgesamt ist das Nutzerspektrum der Meeressoberflächentemperaturdaten neben den Datenerhebern selbst als Erstnutzer aufgrund der freien Verfügbarkeit und weiten Verbreitung der Daten schwer zu erfassen und wird auch bei der Veröffentlichung der Daten nicht näher spezifiziert.



▲ Foto 3.1-2: Das deutsche Forschungsschiff MARIA S. MERIAN in der Labradorsee steuert auf Teile einer Langzeitverankerung zu, die zur Wartung der Komponenten jährlich eingeholt werden. Des Weiteren werden eine ganze Reihe von ECVs auf dem Schiff vermessen.

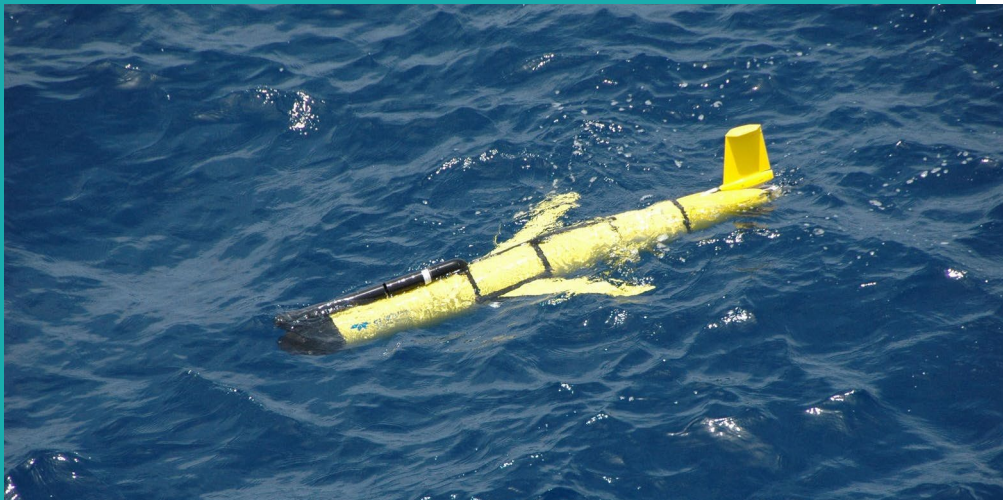
Woher kommen die Ressourcen?

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie ist aufgrund des Seeaufgabengesetzes verpflichtet, den Meeresumweltzustand innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) zu überwachen. Dazu zählt insbesondere auch die Oberflächentemperatur. Das BSH kommt diesem Auftrag zum einen durch regelmäßige Überwachungsfahrten und zum anderen durch stationäre

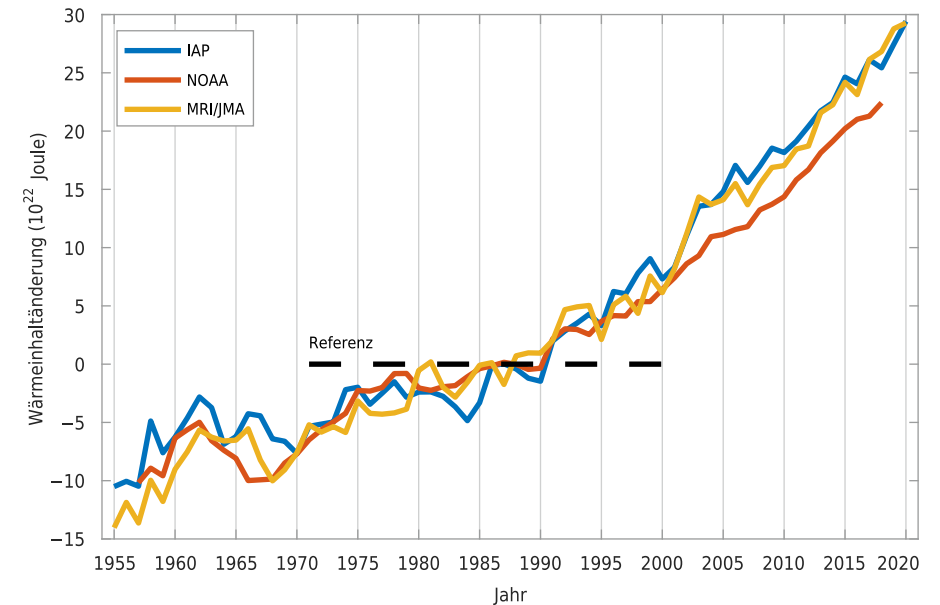
Messungen an festen Messplattformen nach, was daher beides fester Bestandteil des BSH-Haushalts ist. Dies gilt gleichermaßen für die Unterhaltung der nautischen und hydrographischen Dienste. Auch das Küstenmonitoring der Landesämter ist Bestandteil ihrer Aufgaben und somit durch deren Haushalt finanziert.

3.2 Temperatur in der Wassersäule

Die Temperatur ist von zentraler Bedeutung für die Beschreibung physikalischer und chemischer Größen im Meer. Sie beeinflusst maßgeblich die Dichte des Meerwassers, die großskalige Zirkulation, den Meeresspiegel und sie ist ein Kontrollparameter für Ökosysteme. Temperaturmessungen ermöglichen Aussagen zum Zustand des Klimasystems und erlauben es, Verbindungen zwischen terrestrischen, atmosphärischen und ozeanischen Prozessen herzustellen. Die Fortsetzung langer Zeitreihen ist von zentraler Bedeutung für die Beurteilung des Klimas – national wie auch global. Die essentielle Klimavariablen (ECV) Temperatur ist zur Bestimmung anderer ECVs notwendig.



Wärmeinhalt der obersten 2.000 Meter der Weltmeere 1955–2020



▲ Abb. 3.2-1: Veränderung des Wärmeinhalts der obersten 2.000 Meter der Weltmeere zwischen 1955 und 2020 verglichen mit dem Durchschnittswert von 1971 bis 2000, der zu Referenzzwecken auf Null gesetzt wurde. Der Wärmeinhalt der Ozeane wird in Joule, einer Energieeinheit, gemessen. (Quelle: GEOMAR nach EPA)

Klimasignale

Die Meere haben fast 90 % der überschüssigen Wärme aufgenommen, die durch menschliche Aktivitäten im Erdsystem entstanden ist. Die Erwärmung hat Konsequenzen für die thermische Ausdehnung des Meerwassers und damit auf die ECV Meeresspiegel, regional kann sie zum Schmelzen von Meereis

führen wie auch zu Änderungen in der Ozeanschichtung, die wiederum Einfluss auf die Ventilation des Ozeans und auf Meeresorganismen hat. Klare Erwärmungstrends sind in fast allen Meeres- und Küstenregionen detektierbar und der Einfluss beispielsweise auf die Ökosysteme ist klar nachweisbar. ■ ■ ■

◀ Foto 3.2-1: Ein Gleiter bei der Übertragung von Messdaten über Satellitentelefon nach erfolgreicher Beendigung eines Tauchgangs. Auf einer mehrmonatigen Mission sammelt ein Gleiter stündlich Vertikalprofile bis in 1.000 m Tiefe von einer Vielzahl der ECVs, unter anderem Temperatur.

■ ■ ■
Durch Zusammenfügen von Beobachtungsdaten aus unterschiedlichsten Quellen zeigt sich ein deutlicher Anstieg der globalen Ozeantemperatur, ausgedrückt über den Wärmeinhalt, seit Mitte der 1980er-Jahre (Abb. 3.2-1). Die Linien stellen die Ergebnisse dar, die unabhängig voneinander von Regierungsorganisationen in drei Ländern mit unterschiedlichen Methoden berechnet wurden: der National Oceanic and Atmospheric Administration der Vereinigten Staaten (NOAA), dem Institute of Atmospheric Physics Chinas (IAP) und dem Meteorological Research Institute der Japan Meteorological Agency (MRI/JMA). Zum Vergleich: Ein Anstieg um eine Einheit in diesem Diagramm (1×10^{22} Joule) entspricht etwa dem 17-fachen des gesamten Energieverbrauchs aller Menschen auf der Erde in einem Jahr.

Wo wird gemessen?

Temperaturmessungen im Meer werden schiffsgestützt, von autonomen und von fest installierten Plattformen durchgeführt. Die Messungen liegen als Vertikalprofil und als Punktmessung vor. Da robuste und kostengünstige Standardmessverfahren genutzt werden, sind Temperaturmessungen bei nahezu allen Messaktivitäten vertreten. Wichtig für die Nutzung von Temperaturmessungen für Klimastudien ist eine realistische Schätzung der Messgenauigkeit.

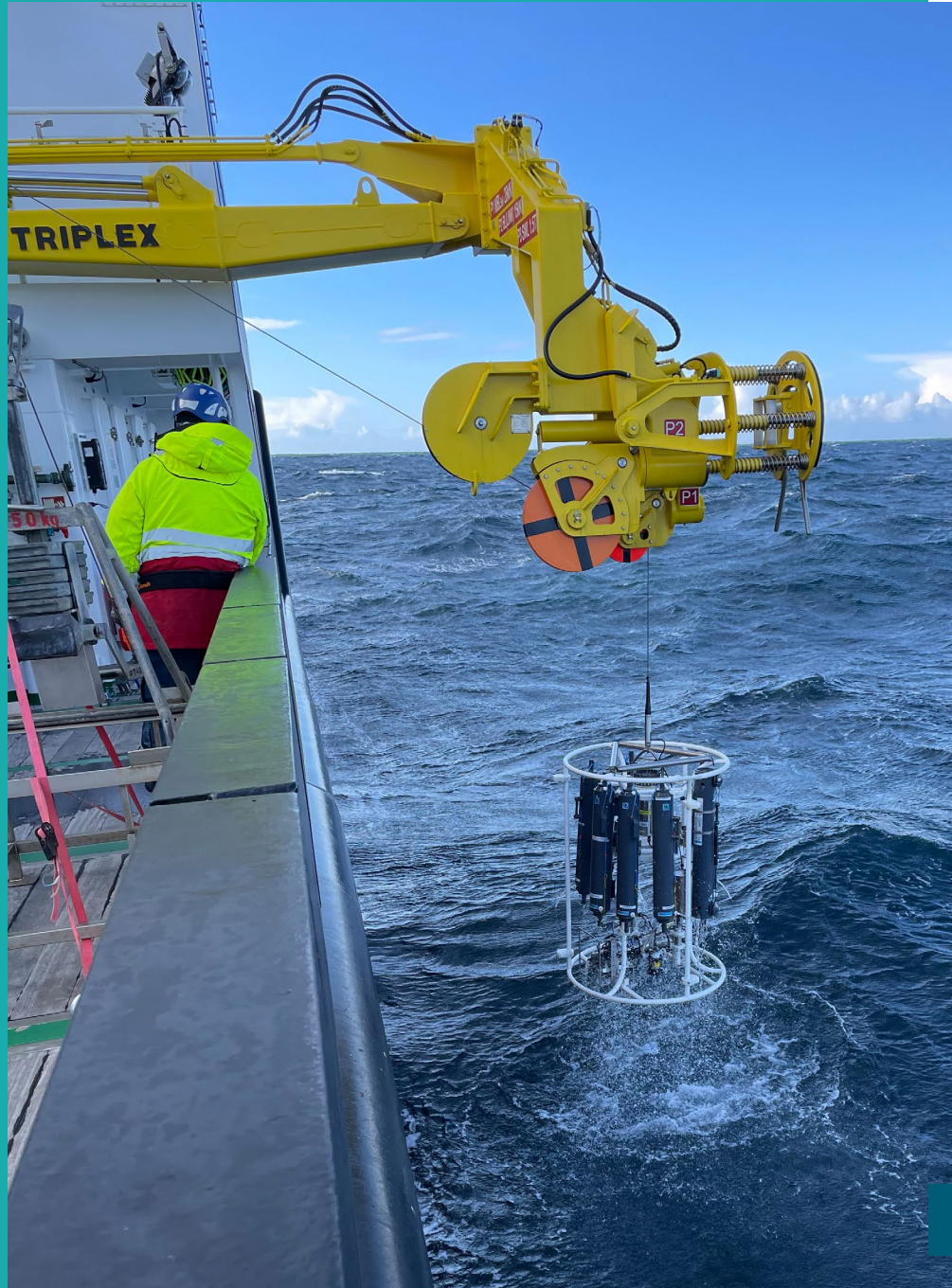


◀ Foto 3.2-2: Ausbringen eines Argo-Tiefendrifters vom Schiff. Der Drifter wird nach der Auslegung für 3 bis 5 Jahre alle 10 Tage ein Tiefenprofil von Temperatur und Salzgehalt von der Oberfläche bis in 2.000 m Tiefe sowie Strömungsinformationen aus etwa 1.000 m Tiefe per Satellit an das internationale Argo-Datenzentrum übertragen. Zurzeit wird das Argo-Messnetz auf Drifter mit biogeochemischen Messgrößen und auf Tiefsee-Anwendungen mit Profilen bis 6.000 m Tiefe erweitert.

Das Messnetz in der Nord- und Ostsee (Abb. 3.0-1) und im offenen Ozean (Abb. 3.0-2) wird durch Messungen an der Küste (Hafenpier, Pegelschacht, Seebrücke) ergänzt, die es ermöglichen, lange Zeitserien zu generieren. Bei den Überwachungsfahrten in den Gewässern der Nord- und Ostsee durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dessen Partner werden aus Temperatur-Profilmessungen Metriken, wie der saisonale Gang, und auch Langzeittrends abgeleitet.

Im offenen Ozean werden von Deutschland wichtige Beiträge zu regionalen und globalen Temperaturmessungen über die gesamte Wassersäule eingebracht. Exemplarisch kann hier die Überwachung des Wärmeinhalts im Ozean genannt werden. Der Wärmeinhalt wird über die Temperatur und die Wassertiefe berechnet. Änderungen im

Wärmeinhalt geben also umfangreicher Auskunft über das Eindringen der Klimaerwärmung als etwa die Betrachtung der Oberflächentemperatur, die keine Information über die Mächtigkeit von erwärmten Schichten angeben kann. Neben Messungen von Schiffen sind in den letzten 20 Jahren auch autonome Plattformen, wie die global operierenden Tiefendrifter aus dem Argo-Messnetz, wichtige Stützpfeiler bei der Bestimmung des Wärmeinhaltes geworden. Der deutsche Beitrag zum Argo-Messnetz von ca. 50 Tiefendriftern pro Jahr wird über das BSH abgewickelt. Die Bestimmung der Erwärmung des tiefen Ozeans benötigt hohe Messgenauigkeiten und die Rückverfolgung zu Referenzmessungen. Hier sind Messungen entlang von Standardschnitten des Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP) von großer Bedeutung. GO-SHIP führt mit einer Wiederholfrequenz von mindestens einer Dekade Messungen durch. Auch werden in Schlüsselregionen Sensoren verankert, die hochaufgelöst (< 1 Stunde) Änderungen registrieren und regelmäßig kalibriert werden. Die Messungen werden über das OceanSITES-Programm global koordiniert.



Internationale Einbettung und Datenzugriff

Temperaturmessungen werden national im Deutschen Ozeanographischen Datenzentrum am BSH und bei PAN-GAEA® archiviert und lassen sich über Datenportale der Deutschen Allianz für Meeresforschung (DAM) oder dem European Marine Observation and Data Network (EMODnet) abrufen. Wenn möglich, werden Temperaturdaten in Quasi-Echtzeit über das Global Telecommunication System (GTS) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) für die Nutzung in Wetter- und Ozeanvorhersagemodellen verbreitet. Der Zugang zu Daten ist auch für die breite Öffentlichkeit über verschiedene Portale möglich (siehe Linksammlung unten).

Woher kommen die Ressourcen?

Der Betrieb des Marinen Umweltmessnetzes in Nord- und Ostsee (MARNET) ist fester Bestandteil des BSH-Haushalts. Dies gilt gleichermaßen für die Durchführung von Überwachungsfahrten und die Unterhaltung der nautischen und hydrographischen Dienste. Die Beteiligung am internationalen Argo-Programm ist ebenfalls langfristig gesichert durch einen eigenen Haushaltstitel des BSH. Die Beiträge aus den Forschungsinstituten beruhen auf Projektförderungen, die typischerweise auf 3-5 Jahre limitiert sind und die durch Folgeprojekte teilweise Zeitserien von mehreren Dekaden hervorbringen.

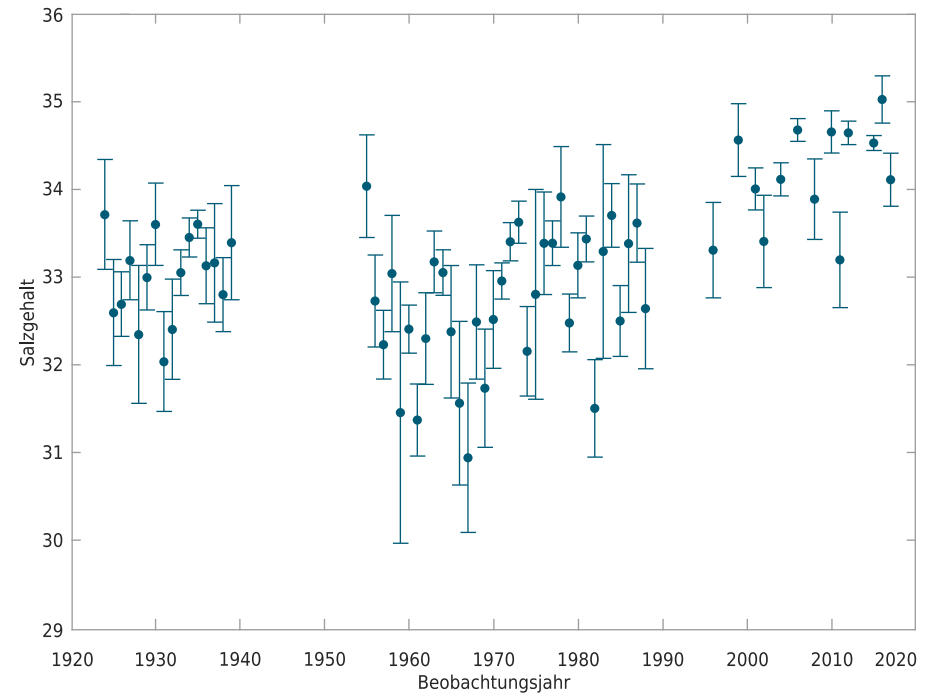
◀ Foto 3.2-3: Das Ende einer Profilmessung mit einer Temperatur-Leitfähigkeits-Tiefensonde an Bord des VWFS Atair

3.3 Salzgehalt in der Wassersäule

Die Verteilung des Salzgehalts im Ozean ist eng mit dem globalen Wasserkreislauf und ozeanischen Transportprozessen gekoppelt. Der Salzgehalt ist, mit der Temperatur und dem Druck, die kontrollierende Größe zur Bestimmung der Dichte des Meerwassers, die wiederum die Schichtung des Ozeans und Bewegungsvorgänge kontrolliert. Daten des Salzgehalts werden in vielen regionalen und globalen Wetter- und Klimaanwendungen verwendet. Der Salzgehalt ist eine Messgröße, die schon seit über 100 Jahren in vergleichsweise guter Qualität im Ozean bestimmt wird und dadurch ein einzigartiges Langzeitarchiv für Änderungen im globalen Wasserkreislauf und der ozeanischen Zirkulation darstellt.



Monatsmittelwerte des Oberflächensalzgehalts im Januar an der Station Ems/Borkum Riff



▲ Abb. 3.3-1: Station Ems/Borkum Riff: Monatsmittelwerte für den Oberflächensalzgehalt für Januar aus historischen Daten (siehe Link am Ende des Beitrags) (Quelle: BSH)

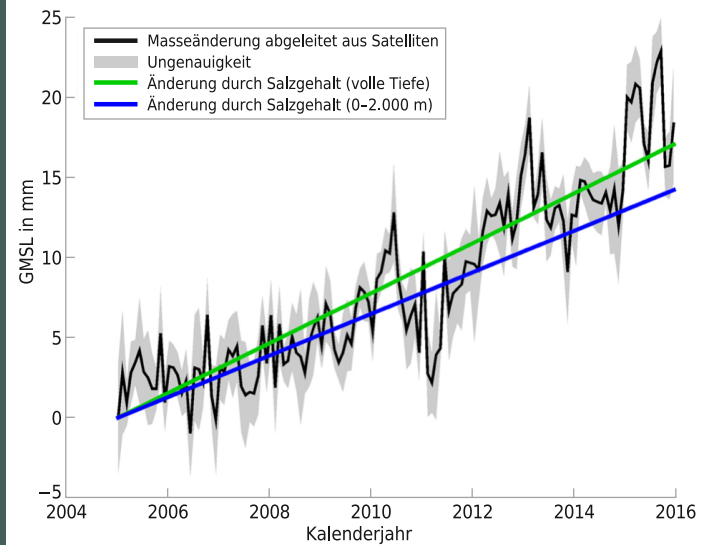
Klimasignale

Für die AWZ-Messungen in Nord- und Ostsee liegen lokal vergleichsweise lange Zeitreihen vor. Die teilweise hohe Variabilität des oberflächennahen Salzgehalts auf kurzen Zeitskalen an küstennahen Stationen, die im Wesentlichen durch den Einfluss der kontinentalen Abflüsse begründet ist, maskiert zum Teil die Bestimmung klimatischer Trends. Exemplarisch für dekadische Zeitreihen sind Helgoland-Reede (seit 1873 beprobt) und Ems/Borkum Riff (seit 1920 beprobt) zu nennen (Abb. 3.3-1). In der Ostsee zeigt der Salzgehalt in

der Wassersäule die Effizienz der Ventilation der tiefen Ostsee durch sporadisch auftretende Einstromereignisse aus der Nordsee an. Diese Einstromereignisse haben daher auch weitreichende Folgen beispielsweise für die Fischerei.

Aus den global erfassten Daten (Schiffe und autonome Messplattformen) konnten durch internationale Zusammenarbeit Signale herausgearbeitet werden, die beispielsweise Änderungen im hydrologischen Zyklus als Antwort auf die globale Erwärmung ■ ■ ■

Beitrag der Ozeanmasse zum globalen mittleren Meeresspiegelanstieg



◀ Abb. 3.3-2: Beitrag der Ozeanmasse zum globalen mittleren Meeresspiegelanstieg in Millimetern abgeleitet aus Satellitendaten (Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), schwarze Kurve) und aus der Analyse der Salzgehaltsabnahme im globalen Ozean (blaue und grüne Kurve für 0–2.000 m bzw. volle Tiefe). Die Schattierung zeigt die 1- σ -Unsicherheit der jeweiligen Schätzungen an. Die Kurven sind der Übersichtlichkeit halber versetzt. (Quelle: BSH nach Llovel et al. 2019)

Wo wird gemessen?

Im Bereich der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) in Nord- und Ostsee wird der Salzgehalt als Teil der schiffsbasierten Monitoringfahrten und durch fest installierte Sensoren an Langzeitstationen im Rahmen der allgemeinen Meeresüberwachung des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), in Kooperation mit dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), im MARNET-Verbund erfasst (siehe Link am Ende des Beitrags). Die Erhebungen knüpfen auch an die ehemals bemannten Wetterschiffe an. Zudem werden Salzgehaltsdaten durch Landesbehörden und Forschungseinrich-

tungen der deutschen Küstenländer gesammelt und in Datenzentren archiviert. In jüngster Zeit kommen auch Daten aus automatischen Messstationen an Offshore-Windenergieanlagen hinzu.

Die Erfassung von Salzgehaltsdaten außerhalb der AWZ ist, mit Ausnahme des Argo Arrays, durch reine Forschungsinteressen definiert, ist prinzipiell global und kann auch Langzeitmessungen beinhalten (siehe Abb. 3.0-2). Dazu werden Schiffsexpeditionen und autonom arbeitende Beobachtungsplattformen (Argo-Drifter, Verankerungen, Gleiter) genutzt. Ein klarer regionaler Fokus liegt auf dem Atlantik, inklusive der angrenzenden Arktischen und Antarktischen

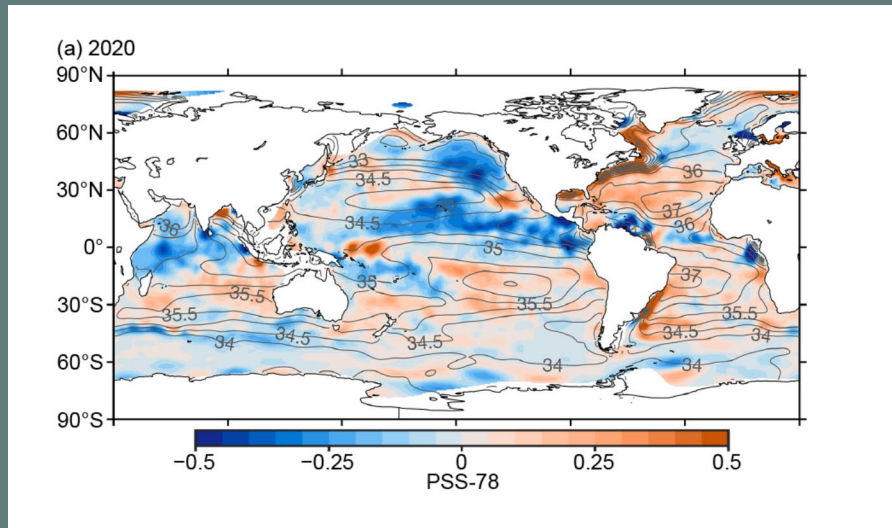
Regionen, aber es werden auch Beobachtungen im Indischen und im Pazifischen Ozean durchgeführt. Der deutsche Beitrag zum globalen Argo-Drifter-Programm, das ungefähr 4.000 Drifter in allen Meeresgebieten aufweist, besteht seit dem Jahr 2000. Die Argo-Drifter erfassen während ihrer Einsatzdauer von mehr als vier Jahren auch die Salzgehaltsverteilung in den oberen 2.000 m des Ozeans. Deutschland steuert ca. 50 neue Argo-Drifter pro Jahr zur Aufrechterhaltung der globalen Messabdeckung bei.

■ ■ ■

zeigen (siehe Abb. 3.3-3). Zusätzlich ist die Abnahme im Salzgehalt ein Resultat des vergrößerten Eintrags von Süßwasser durch Abschmelzen von Festlandeis, Gebirgsgletschern und des Anstiegs von Flusseinträgen. Diese Einträge führen beispielsweise zu einem Netto-Massegewinn des Ozeans, der sich in einem Anstieg des Meeresspiegels zeigt (die sogenannte barystatische Meeresspiegeländerung).

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Die hier aufgelisteten Beobachtungen in der deutschen AWZ wie auch die globalen Beobachtungen werden sowohl auf europäischer Ebene (North West European Shelf Operational Oceanographic System (NOOS), Baltic Operational Oceanographic System (BOOS), Copernicus) wie auch internationaler Ebene durch Mitarbeit an Portalen (z. B. National Oceanographic Data Center (NODC), PANGAEA®) bereitgestellt. Darüber hinaus findet Mitarbeit in Gremien (z. B. Global Ocean Observing System, GOOS; Global Climate Observing System, GCOS; World Climate Research Programme, WCRP) und internationalen Beobachtungsnetzwerken statt, insbesondere in der Observations Coordination Group von GOOS/GCOS. ■ ■ ■



▲ Abb. 3.3-3: Anomalien des Oberflächensalzgehalts für das Jahr 2020 in Bezug auf das langjährige klimatologische Mittel 1955–2012. Aus: Johnson, G.C., Lumpkin, R. (Hrsg.), 2021: *Global Oceans. In: State of the Climate in 2020. Bulletin of the American Meteorological Society* 102, 8, S143–S198, DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0083.1, veröffentlicht von der American Meteorological Society 2021. (Quelle: BSH nach Johnson und Lumpkin 2021)



Diese stellt die Koordination von Argo-Tiefendriftern (Argo), Verankerungen (OceanSITES), Schiffsexpeditionen (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program, GO-SHIP) und Gleitermessungen (OceanGLIDERS) sicher. Viele Forschungsaktivitäten finden zudem im Rahmen internationaler Zusammenschlüsse statt.

Links zu ausgewählten Datenprodukten auf nationalen und internationalen Websites sind am Ende des Beitrags aufgeführt.

Woher kommen die Ressourcen?

Der Betrieb der kontinuierlichen Messstationen in der deutschen AWZ ist mit hohem organisatorischen und personellen Ressourcenbedarf verbunden, der im Etat des BSH zur Verfügung gestellt wird. Die Beteiligung am internationalen Argo-Drifter-Programm am BSH ist durch einen eigenen Haushaltstitel langfristig gesichert. Die Messungen in der AWZ und in internationalen Gewässern, die durch Forschungsinstitute durchgeführt werden, sind auf Projektförderung angewiesen, die naturgemäß auf einige Jahre limitiert ist.

<https://www.marine.csiro.au/~dunn/cars2009/> coriolis.eu.org

bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Meeresumweltmessnetz/messnetz-marnet_node.html

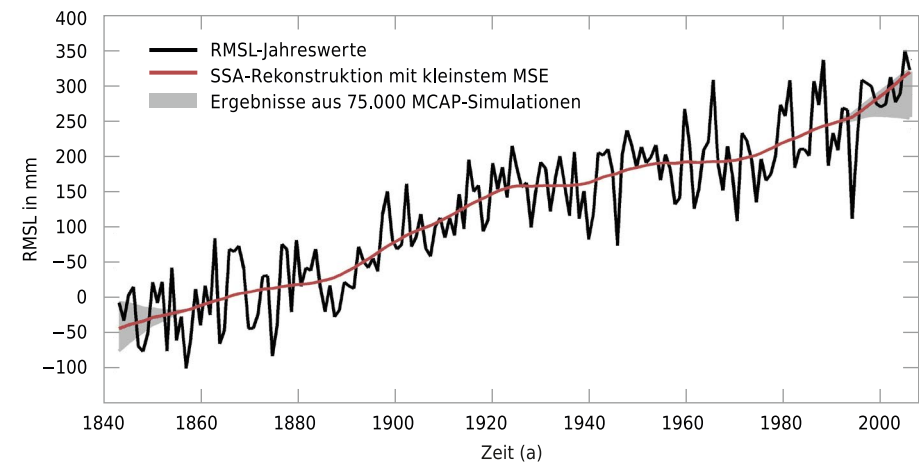
bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Meeresumweltmessnetz/Historische_Daten/historische_daten_node.html

3.4 Meeresspiegel

Meeresspiegeländerungen stellen einen bedeutenden Indikator für Veränderungen des Erdklimas dar. Die Ursachen für klimabedingte Variationen des Meeresspiegels sind komplex und entstehen hauptsächlich aus dem Zusammenspiel der thermischen Ausdehnung des Wassers bei Erwärmung und Änderungen der Ozeanwassermasse aufgrund von Schmelzvorgängen der Eisschilde wie auch Landgletscher. Regional können die Änderungen im Meeresspiegel erheblich vom globalen Mittel abweichen durch Änderungen der Ozeanzirkulation, besonders aber aufgrund vertikaler Landbewegungen als Reaktion auf den Verlust terrestrischer Eismassen seit der letzten Eiszeit (glaziale isostatische Anpassung, GIA).



Synthetische Zeitreihe des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht 1843-2008



▲ Abb. 3.4-1: Eingegangen in die Konstruktion der Zeitreihe sind 13 ausgewählte Pegelstationen mit qualitativ hochwertigen und geprüften Zeitreihen (Wahl et al. 2011). Dargestellt sind jährliche Mittelwerte (in Schwarz) und daran angepasst ein nichtlinearer Trend (in Rot). Der kontinuierliche Anstieg des Meeresspiegels ist relativ zum Land gemessen und beinhaltet Landsenkungseffekte. (Quelle: BSH nach Wahl et al. 2011)

Klimasignale

Aufgrund einer hohen internen Variabilität des Meeresspiegels, die auf natürlichen Fluktuationen im Luftdruck und im Windantrieb der Ozeanzirkulation beruht, sind lange Beobachtungszeitreihen notwendig, um langfristige anthropogene Änderungen im Meeresspiegel statistisch sicher abzuleiten und diese von der natürlichen Variabilität zu trennen. Für die meisten Regionen sind Zeitreihen von mindestens 50 Jahren Länge notwendig, um die natürliche dekadische Variabilität des Ozeans in den Beobachtungen korrekt bei einer Trendanalyse berücksichtigen zu können (Haigh et al. 2009). Aufbauend auf dem Projekt AMSeL des Kura-

toriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), in dem Pegeldaten entlang der deutschen Küste zu einer qualitativ hochwertigen synthetischen Meeresspiegelzeitreihe für die Deutsche Bucht zusammengesetzt wurden, wurden im KFKI-Projekt MSL_absolut-A virtuelle Meeresspiegelzeitreihen für die Nord- und Ostseeküste erstellt. Korrigiert um die jeweilige Landbewegung zeigen sie für die schleswig-holsteinische Küste absolute Anstiegsraten des Meeresspiegels von 1,9 mm/a (Nordsee) bzw. 1,6 mm/a (Ostsee) im Zeitraum 1900–2015. Für den Zeitraum 1993–2015 steigen die Werte schon auf 3,2 (Nordsee) bzw. 2,4 (Ostsee) mm/a ■ ■ ■

und stimmen so mit den Satellitenmessungen sehr gut überein. Viele der vorhandenen Einzelzeitreihen sind allerdings deutlich kürzer und für eine feinere regionale Auflösung der Meeresspiegeländerungen ist daher die Fortsetzung der Langzeitmessungen sowie die Aufbereitung historischer Daten zur Verlängerung der existierenden Messreihen von vorrangiger Bedeutung. Dieses gilt insbesondere für die fortlaufende Beobachtung des Meeresspiegels mittels Satellitenaltimetrie und die Verbesserung existierender Datensätze im Küstenbereich.

Wo wird gemessen?

Für die Sicherheit der deutschen Küste ist ein lokales Gezeitenpegelnetzwerk erforderlich, um regionale und lokale Änderungen im Meeresspiegel zu beobachten. Darüber hinaus ist auch für die Zukunft die Verfügbarkeit von Messungen durch Satellitenaltimetrie und deren verbesserte Nutzung im Küstenbereich essentiell. Systematische Messungen des Meeresspiegels entlang der deutschen Meeresküste gehen für die Messstation Cuxhaven zurück bis 1843. Während die älteren Zeitreihen zeitlich nur sehr grob aufgelöst die Wasserstände für Hoch- und Niedrigwasser wiedergeben, sind an den modernen Pegelstationen mit digitaler Aufzeichnung zeitlich hochaufgelöste Daten im Minutenabstand verfügbar. Heute werden z. B. an der deutschen Nordseeküste durch die Wasser- und Schifffahrtsämter (WSA) und die diversen Landesstellen an 165 Messstationen entlang der Küste und in den gezeitenbeeinflussten Bereichen der Flüsse Wasserstandsmessungen erhoben. Die Messtechnik hat sich im Verlauf der Zeiten kontinuierlich weiterentwickelt von Pegellatten über Schwimmpegel mit graphischer oder digitaler Aufzeichnung, akustische Pegel bis hin zu Druck- und Radarpegeln. Diese unterschiedlichen Messsysteme sind aber alle noch im Einsatz.



▲ Abb. 3.4-2: Positionen der Messstationen entlang der deutschen Küste und in den gezeitenbeeinflussten Bereichen der Flüsse (Quelle: BSH)

Seit Anfang der 90er-Jahre existiert über die Satellitenaltimeter die Möglichkeit, flächendeckende Verteilungen des Meeresspiegels global aus dem All aufzunehmen. Für Meeresgebiete mit größeren Wassertiefen und außerhalb des Küstensockels lassen sich aus den satellitengestützten Messungen damit zentimetergenaue Bestimmungen des Meeresspiegels und seiner Variabilität durchführen. Für die Küstengebiete wird zurzeit noch an der Verfeinerung der Methodik gearbeitet, um die Daten auch im Küstenbereich nutzen zu können. Neue Technologie der Satellitenaltimetrie, wie sie durch die Mission Surface

Water and Ocean Topography (SWOT) bzw. durch Synthetic Aperture Radar (SAR) gestützte Messmethodik realisiert wird, kann dabei helfen, gerade im Küstenbereich zu verbesserten Messungen von Meeresspiegeländerungen zu gelangen.

Ein wichtiger Aspekt, der bei den regionalen Wasserstandsanalysen für die Nordsee zu beachten ist, sind Landhebungs- und -senkungsprozesse, welche z. T. eine Nachwirkung der letzten Eiszeit sind, aber auch auf regionale Förderungen von Gas und Erdöl zurückgehen. Eiszeitbedingte großräumige Hebungs- und Senkungserscheinungen verlaufen in der Regel über mehrere Jahrhunderte linear und überlagern die lokalen Wasserstandsänderungen. Förderbedingte Vertikalbewegungen sind dagegen momentan. Dem überlagert sind Ausgleichbewegungen im Ozean aufgrund von Hebungen um Grönland bzw. um die Antarktis, die sich bis in die Nordsee bemerkbar machen können.

Zur Erfassung dieser Prozesse hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) damit begonnen, Pegel zusätzlich mit GPS-Sendern auszustatten, die eine direkte Bestimmung der Landhebung/-senkung erlauben werden.

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Meeresspiegelmessungen entlang der deutschen Küste in Form von Pegelmessungen sind eingebettet in das internationale Netzwerk Global Sea Level Observing System (GLOSS), das unter der Schirmherrschaft der gemeinsamen technischen Kommission für Ozeanographie und Marine Meteorologie (JCOMM) der Weltorganisation für Meteorologie

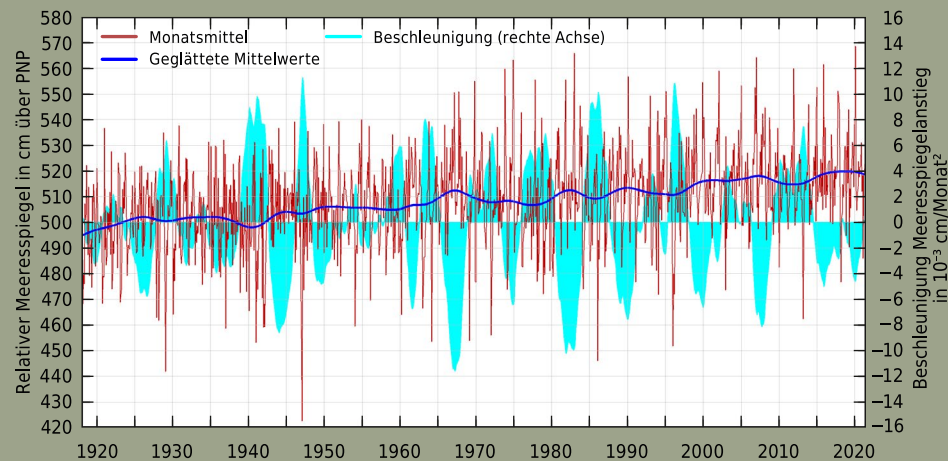
(WMO) und der zwischenstaatlichen ozeanographischen Kommission (IOC) betrieben wird. Es ist Ziel des GLOSS-Netzwerks, global verteilte hochwertige Meeresspiegelmessungen für Anwendungen in der Klimaforschung und für die Küstenforschung bereitzustellen. Zum Kern des Netzwerks gehören 290 Stationen weltweit. Die Bundes-

republik steuert für die deutsche Küste Daten des Pegels Cuxhaven in das Netzwerk ein. Die Daten der deutschen Pegelstationen (nicht nur von Cuxhaven) kann man über Pegelonline abrufen, die der 290 weltweiten Stationen sind auf der GLOSS-Webseite in verschiedenen Modi (real-, fast- oder delayed-time) verfügbar. Auf der Webseite des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) werden monatlich aktualisierte Trend- und Beschleunigungsanalysen des Meeresspiegelanstiegs bei Cuxhaven veröffentlicht, Satellitenzeitreihen des globalen Meeresspiegelanstiegs und daraus abgeleitete Trendanalysen findet man beispielsweise auf der Webseite der Universität Colorado oder der NOAA.

Woher kommen die Ressourcen?

Die Überwachung der Meeresumwelt von Nord- und Ostsee ist in Deutschland durch das Seeaufgabengesetz geregelt. Ein großer Anteil der Entwicklungs- und Servicearbeiten wird aber heute noch durch nationale und internationale Projekte im Rahmen der universitären Forschung finanziert. Zur Nachhaltigkeit der Dienste müssen entsprechende langfristige Fördermittel für die Entwicklungs- und Servicearbeiten etabliert werden. Unerlässlich für den Küstenschutz ist die kontinuierliche Fortsetzung der Satellitenaltimetermissionen der European Space Agency (ESA) und European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) und die dazu notwendigen Investitionen in die Infrastruktur. Zur Nachhaltigkeit der Satellitenanwendungen müssen Fördermittel für die Weiterentwicklung der entsprechenden Anwendungen bereitgestellt werden.

Relativer Meeresspiegel am Pegel Cuxhaven 01/1918-07/2021



▲ Abb. 3.4-3: Monatsmittelwerte (rot) des relativen Meeresspiegels (über Pegelnullpunkt) am Pegel Cuxhaven von 01/1918 bis 07/2021 mit geglätteter Kurve (dunkelblau) sowie Beschleunigung des Anstiegs (hellblau) (Quelle: BSH)

sealevel.colorado.edu/trend-map

star.nesdis.noaa.gov/socd/lssa

pegelonline.wsv.de

gloss-sealevel.org

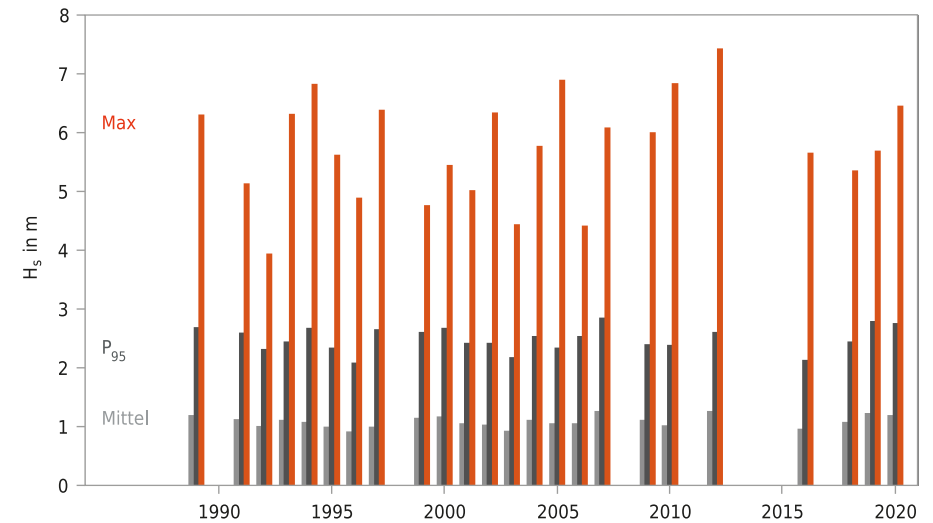
https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Klima/Relativer_Meeresspiegel/relativer-meeresspiegel_node.html

3.5 Seegang

Als Seegang werden die Wellen an der Meeresoberfläche bezeichnet, die durch den Wind erzeugt werden. Veränderungen der Windverhältnisse und der Sturmintensität wirken sich unmittelbar auf den Seegang aus. Er ist somit kein primärer Indikator für Klimaänderungen, jedoch ein wichtiger Parameter für Anpassungsstrategien im Seeverkehr, beim Küstenschutz und in der Offshore-Industrie.



Signifikante Wellenhöhe bei Helgoland 1989-2020



▲ Abb. 3.5-1: Jahresmittelwerte (hellgrau), 95. Perzentil (P_{95} , signifikante Wellenhöhe, die in 95 % des Jahres nicht überschritten wird, dunkelgrau), maximale jährliche signifikante Wellenhöhe (rot). Der letztgenannte Einzelwert ist aufgrund von Datenlücken nicht in jedem Fall das tatsächlich vorgekommene Jahresmaximum. (Quelle: BSH)

◀ Foto 3.5-1: Seegangsmessboje mit Blitzlicht und Antenne, Durchmesser 90 cm

Klimasignale

Dokumentierte Beobachtungen des Seegangs von Seefahrern gibt es schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts, systematische Meldungen von Schiffen seit ca. 70 Jahren. Viele statistische Analysen basieren bisher auf diesen visuellen Beobachtungen. Vergleichbar lange Messreihen wie für atmosphärische Parameter gibt es für Seegang noch nicht. Die gegenwärtig betriebenen Messstationen wurden hauptsächlich zur Unterstützung der Schifffahrt, der Lotsendienste und für Küstenschutzmaßnahmen eingerichtet. Die Daten

stehen jedoch allen Interessenten in Forschung und Wirtschaft zur Verfügung. Die statistisch-klimatologische Bedeutung dieser Messreihen liegt noch überwiegend in der Validierung von numerischen Seegangsmodellen und deren Ergebnissen. Mit Modellen können im Gegensatz zu den wenigen Messstationen längere, lückenlose und flächendeckende Zeitreihen produziert werden. Extremfälle und besonders hohe, gefährliche einzelne Wellen können jedoch nur mit Messmethoden erfasst werden. Einige Jahre der in ■ ■ ■

Wo wird gemessen?

Erst seit den 60er-Jahren des vorigen Jahrhunderts gibt es zuverlässige Messtechnik für Seegang. Die längsten andauernden Messreihen beginnen 1989 an den Stationen Helgoland und Sylt. Sie erfüllen die im Rahmen des Global Climate Observing System (GCOS) aufgesetzten Kriterien einer Mindestlänge von 20 Jahren für klimatologische Zeitreihen. Andere Messstationen wurden später in Betrieb genommen: zwischen 1990 und 2020 zehn Stationen in der Nordsee und zwischen 1991 und 2014 drei Stationen in der Ostsee. Dabei werden fast 50 % der Messstationen durch Forschungsprojekte betrieben. Darüber hinaus werden Seegangsmessungen durch Landesbehörden und Forschungseinrichtungen an küstennahen Orten durchgeführt, meist projektbezogen und mit unterschiedlichen Instrumenten. In jüngster Zeit werden im Zusammenhang mit der Offshore-Windenergieerzeugung weitere Messstationen eingerichtet. Neben diesen Messungen an der Meeresoberfläche gibt es seit den 80er-Jahren auch Fernerkundungsdaten, nämlich Seegangs-

messungen mit Radar-Altimetern von Satelliten aus. Solche globalen Daten sind bei der Europäischen Weltraumbehörde (ESA) verfügbar (im Rahmen des Projektes GlobWave).

Die in der Karte verzeichneten Messstationen sind mit elastisch verankerten wellenfolgenden Messbojen und/oder Wellenradaren bestückt. Die Messdaten werden per Ethernet und Funk, teilweise über Satelliten, an Land gesendet und automatisch verarbeitet sowie zeitnah im Internet bereitgestellt. Über das Seegangsportal des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) können diese Daten und ausgewählte Datenprodukte heruntergeladen werden (siehe Link am Ende des Beitrags).

Gemessen wird die Wasserspiegelauslenkung und das Energiespektrum der Wellen, aus denen nach standardisierten Methoden die wichtigsten Seegangsparameter, u. a. die signifikante Wellenhöhe, mittlere Periode und Richtung, berechnet werden. Es werden auch die höchsten Einzelwellen registriert. Die signifikante Wellenhöhe entspricht der mittleren Höhe des höchsten Drittels aller einzelnen Wellen. Während anfangs die Messwertübertragung nur dreistündlich durchgeführt wurde, ist dies gegenwärtig durch bessere Datenverbindungen alle 30 Minuten möglich. Dadurch können der Seegang und vor allem Extremsituationen besser erfasst werden.

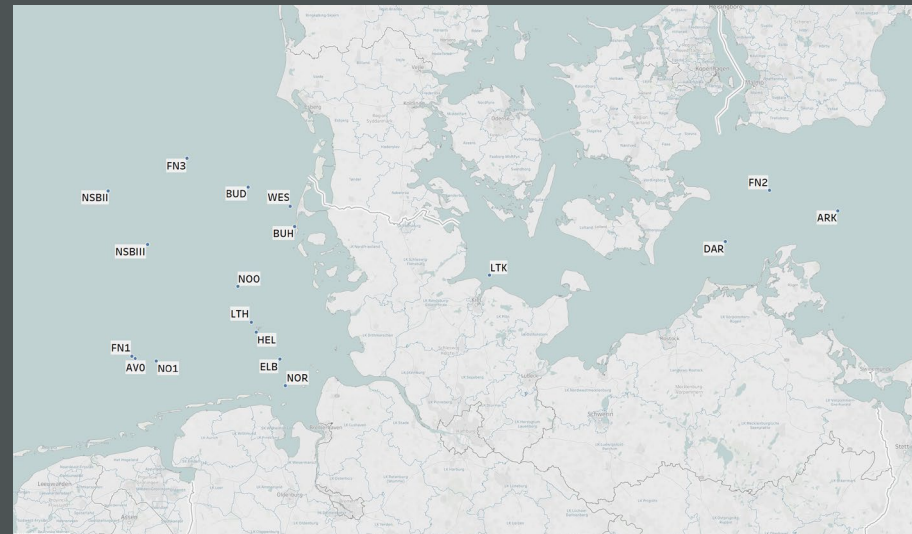


Abb. 3.5-2: Lage der Dauermessstationen für Seegang in der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee. Die Station WES (Sylt) wird betrieben durch den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), die Station BUH (Bunkerhill) durch das Helmholtz-Zentrum Hereon, die übrigen durch das BSH. (Quelle: BSH) ▶

■■■

Abb. 3.5-1 gezeigten Zeitreihe der Wellenhöhe bei Helgoland sind nicht statistisch auswertbar wegen zu vieler Datenlücken. Ein Trend ist in den drei Dekaden beim Mittelwert und 95. Perzentil (P_{95}) nicht erkennbar. Tendenziell höhere Jahresmaxima in den letzten Jahren sind wahrscheinlich auf dichtere Messintervalle zurückzuführen, sodass der Zeitpunkt des höchsten Seegangs in einem Sturm genauer erfasst werden kann.

Gesetzliche Grundlagen

Zur Unterstützung der nachhaltigen Entwicklung in der Schifffahrt, Meeresnutzung und im Meeresumweltschutz werden maritime Informationen im BSH gesammelt, analysiert und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die allgemeine Grundlage dieser Arbeit ist das Seeaufgabengesetz (SeeAufgG).

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Die Daten der Dauermessstationen werden zusammen mit anderen ozeanographischen Daten ausgetauscht im Rahmen der Zusammenarbeit im European Global Ocean Observing System (EuroGOOS) mit den regionalen Sektionen North West European Shelf Operational Oceanographic System (NOOS) für die Nordsee und Baltic Operational Oceanographic System (BOOS) für die Ostsee. Diese Gremien sind Teil des Ozean-Beobachtungssystems von GCOS. Keine der Stationen gehört jedoch zu dem speziell ausgewählten GCOS Surface Network (GSN). Die Datenübertragung geschieht automatisch und stündlich. Die Messungen werden ebenfalls stündlich an den Deutschen Wetterdienst (DWD) übermittelt, der sie im Global Telecommunication System (GTS) weiterverbreitet. Ein wichtiges Hilfsmittel ist das automatische Messnetz (MARNET) für ozeanographische und andere physikalisch-chemische Parameter, das in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und dem DWD betrieben wird. Das BSH hat mit dem Deutschen Ozeanographischen Datenzentrum (DOD) die Aufgabe, den nationalen und internationalen Datenaustausch zu koordinieren.



◀ Foto 3.5-2: An der Hälfte der Messstationen finden oder fanden redundante Messungen mit Seegangsboje und Wellenradar statt. Dabei ist das Wellenradar am Umspannwerk des Offshore-Windparks befestigt. Redundante Messungen dienen dem Abgleich der unterschiedlichen Messsysteme und der Verbesserung der Methodik der Datenqualitätskontrolle.

Woher kommen die Ressourcen?

Die bestehenden Messstationen können voraussichtlich weiter betrieben werden. Messungen auf See sind kosten- und personelaufwändig, die Gefahr von Geräteausfällen oder -verlusten ist hoch. Die Wartung der Systeme ist nicht immer regelmäßig möglich. Das schlägt sich in Unterbrechungen der Messreihen nieder. Um den Datenaus-

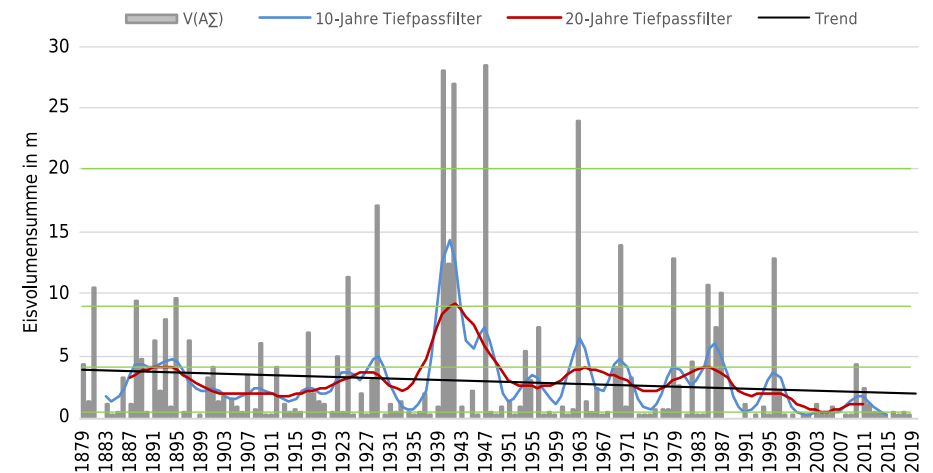
fall gering zu halten, ist zusätzlicher logistischer und personeller Aufwand notwendig. Ungefähr zwei Drittel der eingesetzten Mittel stammen aus Forschungsprojekten und ein Drittel aus Langzeitfinanzierungen. Gerade für Neuentwicklungen sind Forschungsprojekte federführend verantwortlich.

3.6 Meereis

Das Eis auf dem Meer hat in den polaren Gegenden einen starken Einfluss auf die Albedo und damit auch auf den Energiehaushalt. Meereis wirkt wie eine Dämmschicht und vermindert den Wärme- und Stoffaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre. Eis reagiert ziemlich träge, und da die Bedeckung relativ gut bekannt ist, kann diese als guter Indikator von saisonalen bis längerfristigen Schwankungen benutzt werden.



Eiswinterstärke deutsche Ostseeküste ab 1879



▲ Abb. 3.6-1: Verteilung der flächenbezogenen Eisvolumensumme für die deutsche Ostseeküste im Zeitraum von 1879 bis 2020 (Quelle: BSH)

Klimasignale

Auch die relativ kurzen Zeitserien der Eisbedeckung aus Satellitendaten, die ab etwa Ende der 1970er-Jahre vorliegen, sind der Öffentlichkeit gut bekannt, zeigen sie doch einen dramatischen Rückgang des Eises in der Arktis, der sehr wahrscheinlich mit der anthropogenen Klimaerwärmung zusammenhängt. Die direkt beobachteten täglichen Eisinformationen an der deutschen Küste reichen zurück bis an das Ende des 19. Jahrhunderts. Für die gesamte Ostsee gibt es Abschätzungen der maximalen jährlichen Eisaus-

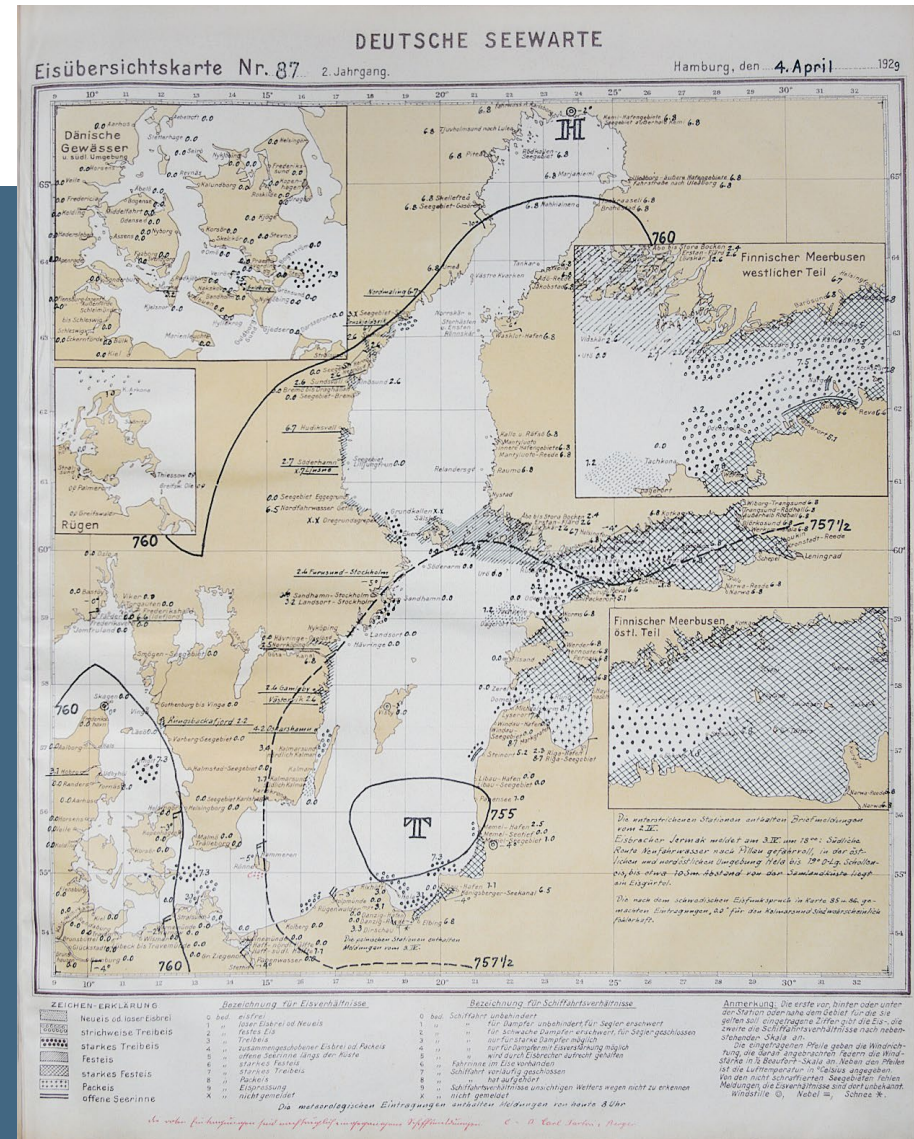
dehnung, die bis 1720 zurückreichen und weiter aktualisiert werden. An der deutschen Ostseeküste konnte mithilfe historischer Dokumente die Schwere der Eiswinter bis 1300 rekonstruiert werden. In solch langen Zeitreihen erkennt man schon längerfristige Klimaschwankungen wie die mittelalterliche Warmzeit und die kleine Eiszeit. Zurückblickend auf die letzten 50 Jahre zeigen Eisatlanten im gesamten Seegebiet um Deutschland herum eine Abnahme der Häufigkeit des Eisauftretens.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Seeaufgabengesetz ist der Eisdienst in deutschen See-Gewässern Aufgabe des Bundes. Der Eisdienst berät die Schifffahrt weltweit und ist am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) angesiedelt, mit einer bis in das Ende des 19. Jahrhunderts und in die Seewetterwarte zurückreichenden Geschichte. Nach dem AntarktUmwSchProtAG ist das BSH auch beteiligt bei den Genehmigungen für Schifffahrten in die Antarktis.

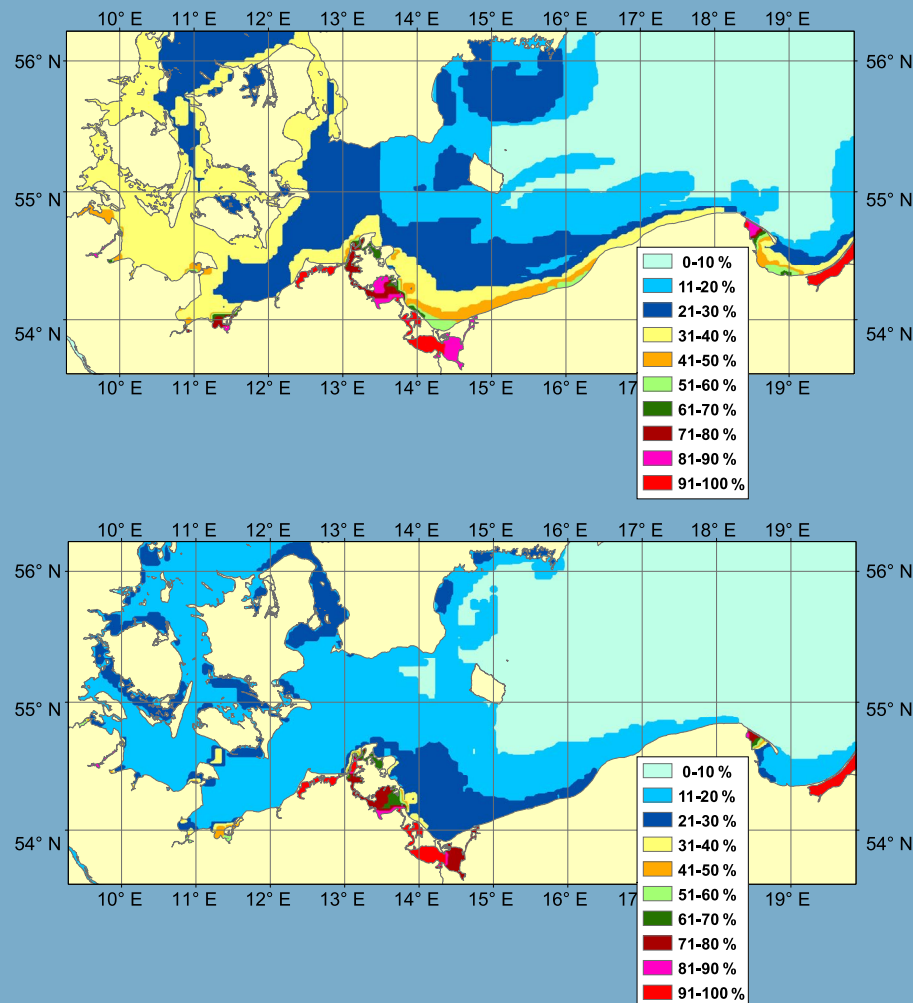
Wo wird gemessen?

Entlang der deutschen Küste werden kontinuierliche Eisbeobachtungen seit Ende des 19. Jahrhundert durchgeführt. Seit dem Winter 1927/28 werden mindestens einmal wöchentlich Eiskarten der deutschen Küste und der gesamten Ostsee hergestellt. Die hauptsächlich erfassten Eisparameter sind Bedeckung und Dicke, dazu kommen noch Schifffahrtsverhältnisse und Form des Eises. Die Daten und Karten sind beim BSH, teilweise schon in digitaler Form, archiviert. Aktuelle Eisinformationen sind kostenlos auf den BSH-Seiten im Internet verfügbar. Seit ein paar Jahren wird die aus Satellitendaten bestimmte Eisbedeckung, mit weltweiter Abdeckung, auch kontinuierlich von den Universitäten Bremen und Hamburg hergestellt und kostenlos im Internet verbreitet. Wissenschaftliche Untersuchungen des Meereseis werden vom Alfred-Wegener-Institut - Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und von einigen Universitäten durchgeführt. Vieles davon sind Prozessstudien, die weltweit, aber nicht kontinuierlich durchgeführt werden. Messungen über einen längeren Zeitraum liegen im Besonderen im Gebiet der Framstraße und nördlich davon vor.



▲ Abb. 3.6-2: Eisübersichtskarte der Ostsee vom 4. April 1929, die 87. Eiskarte des zweiten Jahrgangs (Quelle: BSH)

Abnehmende Häufigkeit des Eisauftritts



▲ Abb. 3.6-3: Häufigkeit des Eisauftritts in der westlichen Ostsee in den Jahren 1961-1990 (oben) und 1981-2010 (unten) (Quelle: BSH)

Internationale Einbettung und Datenzugriff

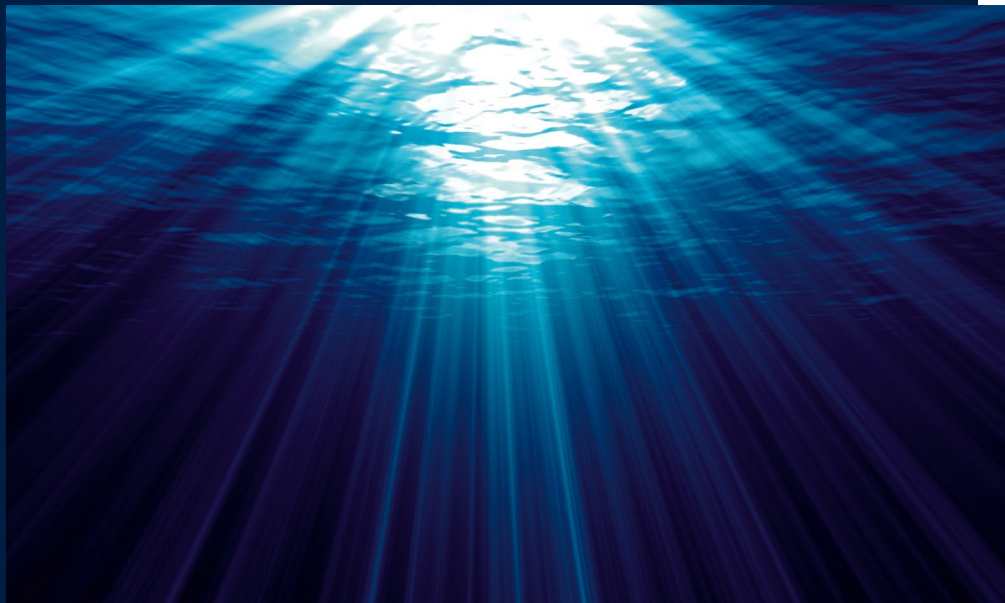
Die enge Zusammenarbeit der Ostsee-Eisdienste kann bis 1925 zurückverfolgt werden. Seit Jahrzehnten, auch während des kalten Krieges, werden täglich Daten und Berichte ausgetauscht. Es werden regelmäßige Treffen veranstaltet und es gibt eine gemeinsame Webpräsenz. Weltweit besteht eine sehr gute Zusammenarbeit über die International Ice Charting Working Group (IICWG), mit jährlichen Treffen, auf denen nicht nur operationelle, sondern auch wissenschaftliche Fragestellungen besprochen werden. Da die Eisdienste in großem Umfang Satellitendaten benutzen, gibt es auch guten Kontakt zu der Fernerkundung (z. B. zur Europäischen Weltraumorganisation ESA, zur amerikanischen Ozean- und Atmosphärenforschungsbehörde NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) etc.). Die internationale Regulierung und Standardisierung der operationellen Eisinformationen erfolgt in Gremien der WMO und der Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC).

Woher kommen die Ressourcen?

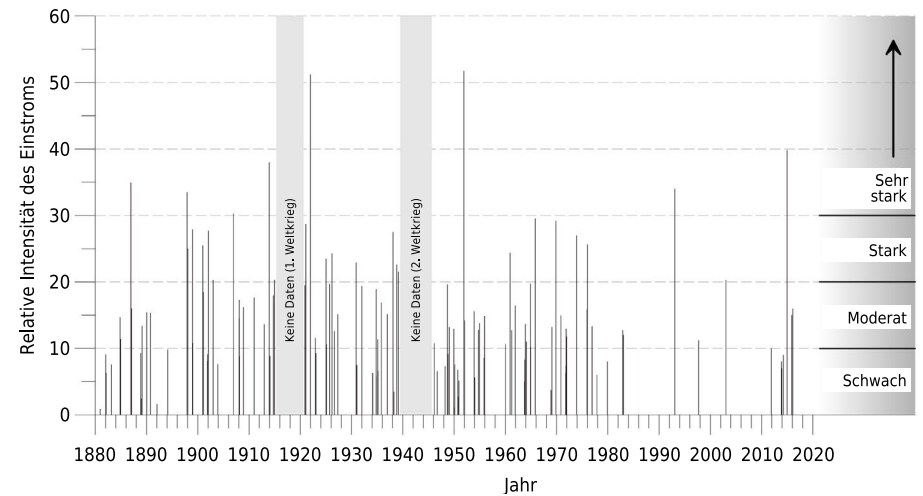
Die grundlegenden Arbeiten des Eisdienstes werden auch in Zukunft aufgrund der Gesetzesvorgabe finanziell relativ gut abgesichert sein. Einige der vom Eisdienst genutzten Satellitenkarten werden von Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften an Universitäten bereitgestellt, die diese Dienstleistung lediglich ehrenamtlich erbringen. Weitergehende Dienste und wissenschaftliche Untersuchungen basieren auf zusätzlichen Geldern, meist von den Ländern über den Bund bis zur EU. Die Nachhaltigkeit dieser Gelder ist aber meist nicht gegeben. Eine besondere Bedeutung hat die kontinuierliche Fortsetzung der Satellitenmissionen (hauptsächlich Synthetic Aperture Radar (SAR), aber auch viele andere) und die kostenlose Bereitstellung der Satellitendaten für die Dienste und die Wissenschaft.

3.7 Meeresströmungen

Strömungen kontrollieren Wärme-, Süßwasser- und Stofftransporte im Meer. Strömungen haben vielerlei Ursachen (Winde, Druckgradienten, Gezeiten) und werden direkt (z. B. mechanisch, akustisch, Partikelbewegung) oder indirekt (Dichte-/Druckmessungen) gemessen. Indirekte Messungen nutzen weitere Essentielle Klimavariablen (ECVs), beispielsweise Temperatur (3.1) und Salzgehalt (3.3) oder den Meeresspiegel (3.4). Die Bestimmung von Schwankungen in Wärme-, Süßwasser- und Stofftransporten nutzt zusätzliche ECVs. Die Variabilität von Strömungen kann auf kurzen Zeitskalen groß sein (z. B. Gezeiten) und lange, hochaufgelöste Zeitserien sind zur Detektierung von Klimasignalen nötig.

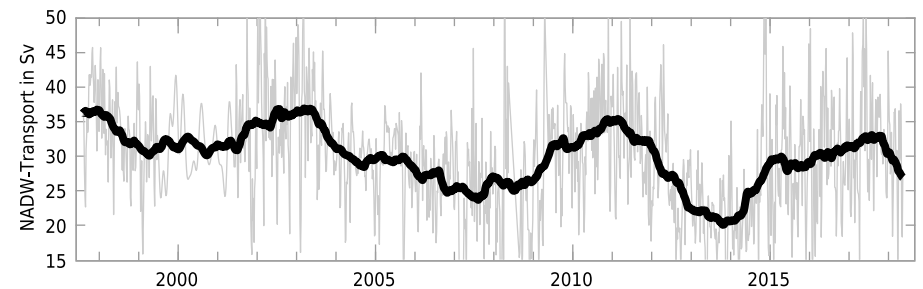


Einstromereignisse in die Ostsee zwischen 1880 und 2015



▲ Abb. 3.7-1: Häufigkeit und Intensität der Einstromereignisse in die Ostsee zwischen 1880 und 2015 (Quelle: GEOMAR nach Feistel et al. 2016)

Volumentransport des Nordatlantischen Tiefenwassers am Südausgang Labradorsee



▲ Abb. 3.7-2: Zeitliche Entwicklung des Volumentransports des Nordatlantischen Tiefenwassers (NADW) am Südausgang der Labradorsee für die Jahre von 1997 bis 2018. Die Wochenmittel sind als graue Linie dargestellt, das laufende Jahresmittel als schwarze Linie. (Quelle: GEOMAR)

Klimasignale

Beispiele aus der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) sind Messungen in Nord- und Ostsee, wo auch lokal vergleichsweise lange Zeitreihen von vielen Jahrzehnten vorliegen. In der Ostsee sind Einstromereignisse mit der Effizienz der Ventila-

tion der tiefen Ostsee verbunden. Diese Einstromevents, die sich aus der Kombination von Meeresbodentopographie und bestimmten Windlagen ergeben, haben großen Einfluss auf das Ökosystem der Ostsee (siehe auch ECV Sauerstoff). ■ ■ ■



Die Skalierung von Strömungsmessungen über eine repräsentative Fläche erlaubt es, einen Transport zu ermitteln. Ozeanische Transporte können mit weiteren Kenngrößen des Klimasystems in Verbindung gebracht werden,

beispielsweise der meridionale Wärmetransport im Ozean mit dem in der Atmosphäre. Transporte werden in der Einheit Sverdrup (Sv) angegeben, wobei $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ sind.

Wo wird gemessen?

Im Bereich der deutschen AWZ werden schiffsbasierte und stationäre Beobachtungen durchgeführt. Die Zirkulationsverhältnisse und deren langjährige Änderungen werden im jährlich aktualisierten Nordseezustandsbericht vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) veröffentlicht. Die stationären Messungen nutzen verankerte Geräte, die an Schlüsselpositionen installiert sind und die den Zu- und Abfluss für größere Regionen kontrollieren. Beispielsweise erlauben es

Messungen im Fehmarnbelt, der Darßer Schwellen und der Arkona See, die Menge an ein- und ausströmendem Wasser der Ostsee zu kartieren (Verbund zwischen BSH und Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) im MARNET).

Auch im offenen Ozean sind Strömungsmessungen meist in große internationale Verbünde eingebettet (Globales Ozeanbeobachtungssystem GOOS). Es werden federführend von Deutschland direkte Messungen an Schlüsselpositionen in polaren Gebieten der Arktis

Internationale Einbettung

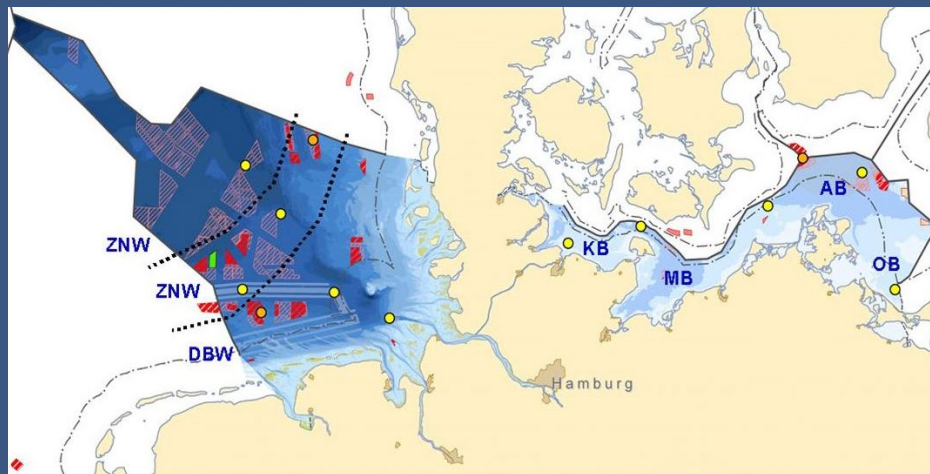
Die Langzeitmessungen im offenen Ozean sind in internationale Initiativen eingebunden. Die Koordination in internationalen Programmen erlaubt es erst, regionale Beobachtungen in beckenweite Beobachtungen des Systems Atlantik zu überführen. Internationale Aktivitäten wie das Global

Ocean Observing System (GOOS), das Global Climate Observing System (GCOS), das Projekt Climate Variability and Predictability (CLIVAR) des World Climate Research Programme (WCRP) oder das AtlantOS Programme helfen, die Beobachtungsaktivitäten an die Bedürfnisse einer Vielzahl von Stakeholdern anzupassen. Die Koordination der Messsysteme geschieht über die internationalen Beobachtungsnetzwerke wie Argo, OceanSITES, GO-SHIP und die Satellitenprogramme. Die Definition von Standards, Qualitätssicherung und Austauschbarkeit der Messdaten spielen bei Langzeitmessungen eine herausragende Rolle und die internationale Vernetzung in Programmen wie der OceanSITES-Initiative sind notwendig.

(Framstraße) und Antarktis (Weddellmeer), in Randstromregionen (Labradorsee, brasilianische und angolische Küste) und am Äquator erhoben. Die Messungen in Schlüsselpositionen werden durch internationale Kooperationen in beckenweite Transporte zusammengestellt, die beispielsweise mit der klimakontrollierenden Atlantischen Umwälzzirkulation im Zusammenhang stehen. Auch indirekte Strömungs- und Transportmessungen im offenen Ozean werden routinemäßig erfasst, dazu gehören die Messungen der ECVs Temperatur und Salzgehalt durch das globale Argo-Programm (Beiträge über das BSH) und durch Schiffsmessungen im Verbund mit dem Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP).

Woher kommen die Ressourcen?

Die AWZ-Arbeiten sind über das Monitoring des BSH abgedeckt, zudem werden substantielle Beiträge durch Forschungsprojekte von Universitäten und außeruniversitären Instituten eingebracht. Die deutschen Beiträge zu Strömungsbeobachtungen im offenen Ozean werden für das Argo-Tiefseedrifter-Programm über das BSH finanziert. Die Verankerungen und Schiffsmessungen werden durch nationale und europäische Forschungsprojekte und durch Mittel aus der Programmorientierten Förderung der Helmholtz-Zentren finanziert. Aus offensichtlichen Gründen birgt die projektbezogene Förderung immer das Risiko, dass Langzeitmessungen eingestellt werden müssen.



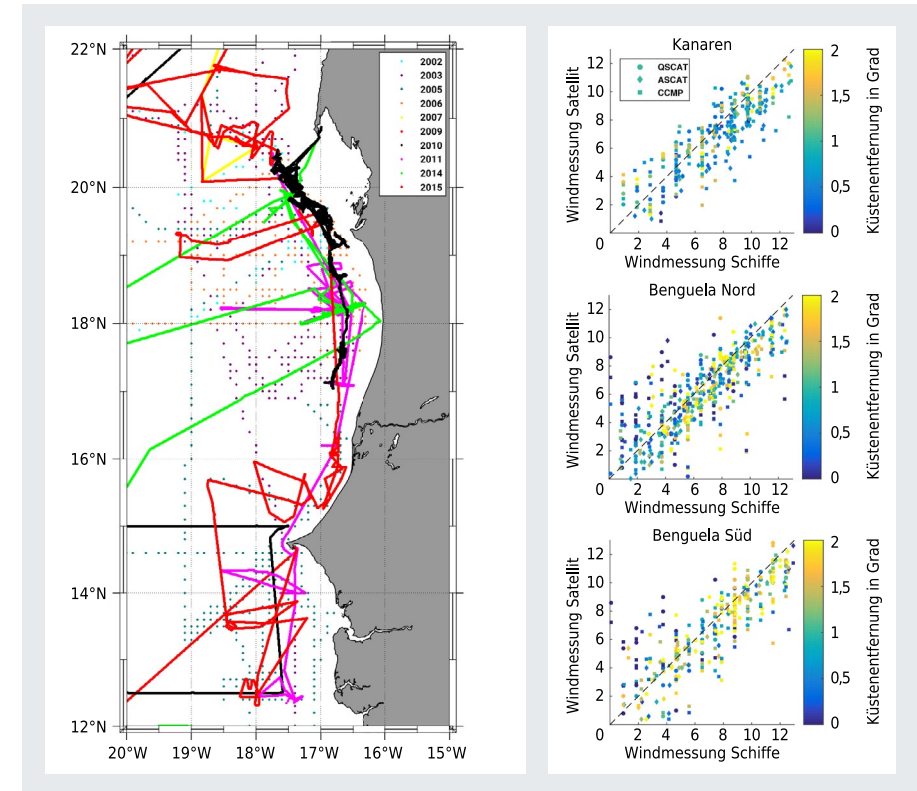
◀ Abb. 3.7-3: Karte der deutschen AWZ (blau hinterlegt) mit den Positionen der MARNET-Stationen (gelbe Punkte). In der Nordsee wurden die unterschiedlichen Wassermassenbereiche gekennzeichnet (ZNW=Zentrales-Nordsee-Wasser, DBW=Deutsche-Bucht-Wasser), in der Ostsee die topographischen Abgrenzungen (KB=Kieler Bucht, MB=Mecklenburger Bucht, AB=Arkona-Becken, OB=Oder-Bucht). (Quelle: BSH)

3.8 Windschubspannung

Der Wind übt auf die Meeresoberfläche eine Schubspannung aus, die einen elementaren Antrieb für Bewegungsvorgänge im Meer darstellt. Die Schubspannung wird selten direkt gemessen. Sie wird über den Windschub-Koeffizienten und die Essential Climate Variable (ECV) Wind, unter Berücksichtigung der ECV Oberflächenströmungen, abgeleitet. Die Windschubspannung kann aus historischen Schiffsbeobachtungen über Zeiträume von mehr als 100 Jahren berechnet werden und erlaubt Ursachen für Klimaschwankungen zu diagnostizieren. Auch die Verbesserung der Parametrisierung der Schubspannung ist für Klimastudien von großer Bedeutung.



Vergleich von Schiffsmessungen mit satellitenbasierten Messungen



▲ Abb. 3.8-1: Vergleich von Schiffsmessungen (Positionen im linken Bildteil) mit räumlich und zeitlich deckungsgleichen satellitenbasierten Messungen (rechter Bildteil) (Quelle: Schlundt/GEOMAR)

◀ Foto 3.8-1: Effekte des Windeintrags über dem Meer

Klimasignale

Variabilität und Trends in der Windschubspannung sind aufgrund der engen Verbindung mit der ozeanischen Zirkulation ein Antrieb für Klimaschwankungen. So können langsame Verschiebungen der Windsysteme, gekoppelt über die Windschubspan-

nung, zu systematischen Verlagerungen von Strömungssystemen führen. Windschubspannung ist auch eng an die Intensität von Küstenauftrieb gekoppelt, was wiederum mit der ozeanischen Produktivität und nachfolgend der Fischerei verbunden ist. Von großer

■ ■ ■
Bedeutung für Klimaprognosen ist die Parametrisierung der Windschubspannung und dabei insbesondere die Formulierung des Widerstandsbeiwertes. Arbeiten zu diesem Thema sind ein gutes Beispiel für den Nutzen von Prozessstudien als Beitrag zur Klimaforschung. Ein weiteres Forschungsgebiet

adressiert die Konsistenz von Datensätzen, die aus unterschiedlichen Quellen stammen, z. B. Schiffsdaten und Satellitenmessungen (Abb. 3.8-1). Hierbei stehen systematische Abweichungen, deren Ursache und deren Korrektur im Fokus.

Internationale Einbettung

Windmessungen auf Schiffen sind Teil des Voluntary-Observing-Ship(VOS)-Programms, welches ein Beobachtungsnetzwerk des Ship Observations Team (SOT) ist, das seine Aktivitäten mit dem Global Ocean Observing System (GOOS) koordiniert und das wiederum mit dem GCOS verbunden ist.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) als Nationaler Wetterdienst der Bundesrepublik Deutschland betreibt zur Erfüllung seiner im DWD-Gesetz (DWDG) verankerten Aufgaben ein Maritimes Messnetz. Im Rahmen dieses Maritimen Messnetzes betreibt der DWD eine eigene VOS-Flotte mit derzeit (Stand 06/2021) ca. 600 Stationen (davon ca. 120 automatische Bordwetterstationen) auf verschiedensten Schiffen, die im Rahmen des VOS-Programms an der freiwilligen Wetterbeobachtung auf See teilnehmen. In Summe wurden in

2020 von diesen DWD-VOS-Stationen etwa 670.000 Beobachtungen ins Globale Telekommunikationssystem (GTS) eingespeist und für Wetter- und Klimaanalysen bereitgestellt. Global haben ca. 2.700 VOS-Stationen um die 2,6 Millionen Beobachtungen bereitgestellt. Koordination geschieht auch auf europäischer Ebene (E-Surfmar des Network of European Meteorological Services (EUMETNET)) und global durch den VOS Panel als Teil des SOT. In beiden Gruppen vertritt der DWD die Interessen der Bundesrepublik Deutschland. Für die Archivierung und zum Austausch internationaler Schiffswettermeldungen betreibt der DWD im Rahmen des WMO/IOC MCDS (Marine Climate Data System) ein VOS-GDAC (Global Data Assembly Centre, siehe Link unten).

Wo wird gemessen?

Messungen werden von Schiffen, fest installierten Plattformen und von verankerten und frei driftenden Oberflächenbojen durchgeführt. Aus Satellitendaten lässt sich mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung die Windschubspannung ableiten. Eine Motivation für das In-situ-Messnetz sind Referenzmessungen (z. B. Zeitserienstationen), die auch zur Validierung von Reanalysen und von Satellitendaten genutzt werden. Die für die Parametrisierung benötigten ECVs werden von Forschungs- wie auch Containerschiffen (VOS-Programm) aufgezeichnet und liegen entlang von Fahrtrouten mit hoher zeitlicher Auflösung vor. Messplattformen in Nord- und Ostsee werden für Prozessstudien zur Verbesserung der Parametrisierung genutzt.

Woher kommen die Ressourcen?

Das Maritime Messnetz des DWD ist ein voll operationelles Messnetz im Geschäftsbereich Technische Infrastruktur und Betrieb des DWD. Somit sind die VOS-Aktivitäten der Bundesrepublik Deutschland im Haushalt des DWD verortet. Das E-Surfmar ist ein optionales Programm in der EUMETNET Observations Capability Area. Das Management ist in der laufenden Fünf-Jahres-Periode bis Ende 2023 an Météo-France vergeben und über EUMETNET-Mittel finanziert. Das Programm VOS ermöglicht die globale Koordination und verfügt lediglich über ein kleines Budget, das auf freiwilliger Basis von den Mitgliedern zur Verfügung gestellt wird.

Mit dem Pilotprojekt zu »Unterswegs«-Forschungsdaten der Deutschen Allianz für Meeresforschung (DAM) wird seit 2019 eine Infrastruktur aufgebaut, die den Datenstrom von hier relevanten ECVs von deren Erfassung über die Qualitätskontrolle bis zur Datenarchivierung sicherstellt. Weitere Messungen gehen auf Forschungsprojekte zurück, die typischerweise nur von kurzer Laufzeit (3–5 Jahre) sind.

3.9 Oberflächenwärmefluss

Der Oberflächenwärmefluss bezeichnet den Austausch von Wärme zwischen Ozean und Atmosphäre und ist eng mit der Rolle des Ozeans im Klimasystem verbunden. Etwa 90 % der zusätzlichen Wärme, die seit der Industrialisierung in die Atmosphäre entlassen wurde, ist vom Ozean aufgenommen worden. Der Wärmefluss wird in vier Komponenten unterteilt: solare und terrestrische strahlungsbasierte Wärmeflüsse sowie turbulente Wärmeflüsse durch Verdunstung und Wärmeleitung. Die Wärmeflüsse lassen sich aus historischen Schiffsbeobachtungen weit über die letzten 100 Jahre hinaus bestimmen.



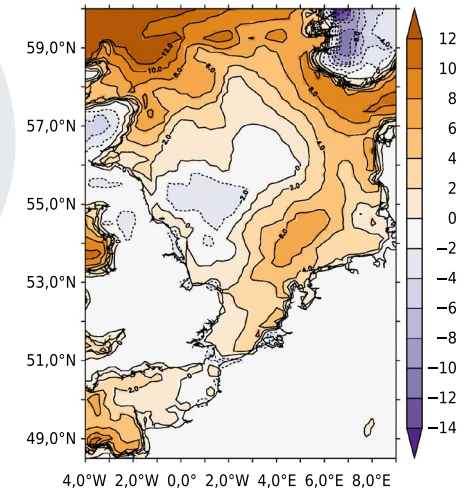
Klimasignale

Die Variabilität der Oberflächenwärmeflüsse ist eng mit Klimafaktoren wie regionalen und globalen Mustern der Meereserwärmung, Änderungen in der Schichtung und auch der Löslichkeit von Gasen gekoppelt, die wiederum mit anderen ECVs verbunden sind (siehe beispielsweise 3.2 Temperatur in der Wassersäule).

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Das Voluntary-Observing-Ship (VOS)-Programm ist ein Beobachtungsnetzwerk des Ship Observations Team (SOT), welches im Global Ocean Observing System (GOOS, kofinanziert von der WMO und der Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) der UNESCO) organisiert ist.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) als nationaler Wetterdienst der Bundesrepublik Deutschland betreibt zur Erfüllung seiner im DWD-Gesetz (DWDG) verankerten Aufgaben auch ein Maritimes Messnetz. Im Rahmen dieses Maritimen Messnetzes unterhält der DWD eine eigene VOS-Flotte mit derzeit (Stand 06/2021) ca. 600 Stationen (davon ca. 120 automatische Bordwetterstationen) auf verschiedensten Schiffen, die im Rahmen des VOS-Programmes an der freiwilligen Wetterbeobachtung auf See teilnehmen. In Summe wurden in 2020 von diesen DWD-VOS-Stationen ca. 670.000 Beobachtungen ins Global Telecommunication System (GTS) eingespeist. Glo-



▲ Abb. 3.9-1: Klimatologische jährliche Mittelwertänderungen des Netto-Wärmeflusses (W/m^2) des RCA4-NEMO-RCP8.5-Ensemble-Mittels zwischen den simulierten Perioden 1970–1999 und 2070–2099. Blaue Farben zeigen einen erhöhten Wärmeverlust bzw. einen verringerten Wärmegewinn der Nordsee an. (Quelle: GEOMAR nach Dieterich et al. 2019, lizenziert unter CC0 1.0)

bal haben ca. 2.700 VOS-Stationen ca. 2,6 Mio. Beobachtungen bereitgestellt.

Koordiniert werden die verschiedenen nationalen VOS-Flotten auf europäischer Ebene von dem Programm E-Surfmar des Network of European Meteorological Services (EUMETNET), global vom VOS-Panel als Teil des SOT. In beiden Gruppen vertritt der DWD die Interessen der Bundesrepublik Deutschland.

Die VOS-Daten werden über den DWD in das GTS eingebracht. Die Daten der Messplattformen in Nord- und Ostsee sind über die verbundenen Daten-

◀ Foto 3.9-1: Seerauch, aufgenommen im März 2020 von Bord der FS POLARSTERN

portale abrufbar. Auf die auf Satelliten-
daten basierenden HOAPS-Daten lassen
sich über das Datenportal der European
Organisation for the Exploitation of
Meteorological Satellites (EUMETSAT)
zugreifen. Für die Archivierung und

zum Austausch internationaler Schiffs-
wettermeldungen betreibt der DWD
im Rahmen des Marine Climate Data
System (MCDS) der WMO und der IOC
ein VOS GDAC (Global Data Assembly
Centre, siehe Link unten).

Woher kommen die Ressourcen?

Das Maritime Messnetz des DWD ist ein voll operationelles Messnetz im Geschäftsbereich Technische Infrastruktur und Betrieb des DWD. Somit

sind die VOS-Aktivitäten der Bundesrepublik Deutschland im Haushalt des DWD verortet.

Das EUMETNET-Programm E-Surfmar ist ein optionales Programm in der Observations Capability Area. Das Management ist aktuell bis Ende 2023 an Météo-France als »responsible member« vergeben und über EUMETNET-Mittel finanziert. EUMETNET-Programme werden für jeweils fünf Jahre geplant und nach Ausschreibung an ein EUMETNET-Mitglied vergeben. Die Programmphase nach 2023 ist bereits in der Planung.

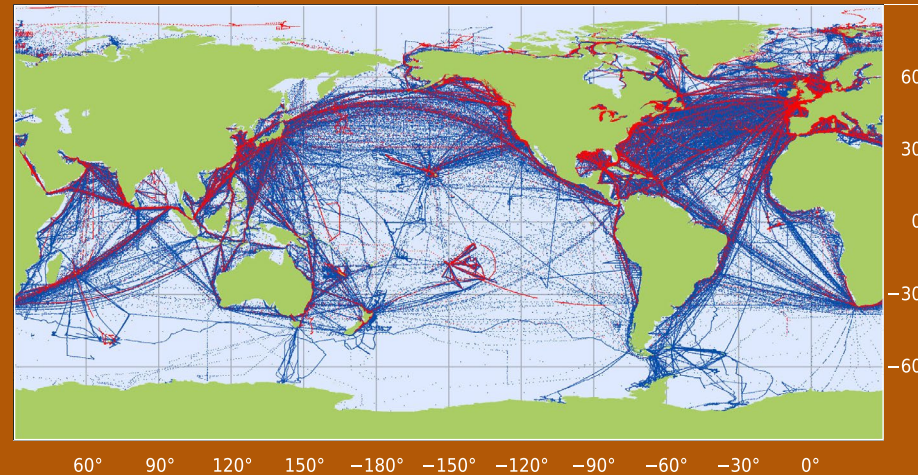
Die globalen Programme VOS und SOT sind nur organisatorischer Natur und verfügen lediglich über ein kleines Budget (für Reisekosten etc.), das auf freiwilliger Basis von Mitgliedern zur Verfügung gestellt wird.

Mit dem Pilotprojekt zu »Unterwegs«-Forschungsdaten der Deutschen Allianz für Meeresforschung (DAM) wird seit 2019 eine Infrastruktur aufgebaut, die den Datenstrom von hier relevanten ECVs von deren Erfassung über die Qualitätskontrolle bis zur Datenarchivierung, auch für Klimaanwendungen im Kontext von GCOS, sicherstellen kann. Weitere Messungen gehen auf Forschungsprojekte zurück, die typischerweise nur von kurzer Laufzeit (3–5 Jahre) sind.

Wo wird gemessen?

Für Klimastudien liegt das Interesse darin, alle vier Komponenten des Oberflächenwärmeflusses gleichzeitig vorliegen zu haben, um so den Netto-Oberflächenwärmefluss bestimmen zu können. Die turbulenten Flüsse werden über Parametrisierungen aus ozeanischen und meteorologischen Parametern abgeleitet (Wind, Luft- und Wassertemperatur, Feuchte, Oberflächenströmung). Für die Strahlung sind direkte Messungen nötig (Pyranometer, Pyrgeometer), zur Näherung werden Kenntnisse über den lokalen Aufbau der Atmosphäre (u. a. Wolkenbedeckung und -struktur, Temperatur, Wasserdampf- und Aerosolgehalt) genutzt.

Die notwendigen Messungen werden von Schiffen, fest installierten Plattformen und von verankerten und frei driftenden Oberflächenbojen durchgeführt. Auch die Bestimmung aus Satellitendaten ist möglich (z. B. Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data, HOAPS). Eine Motivation



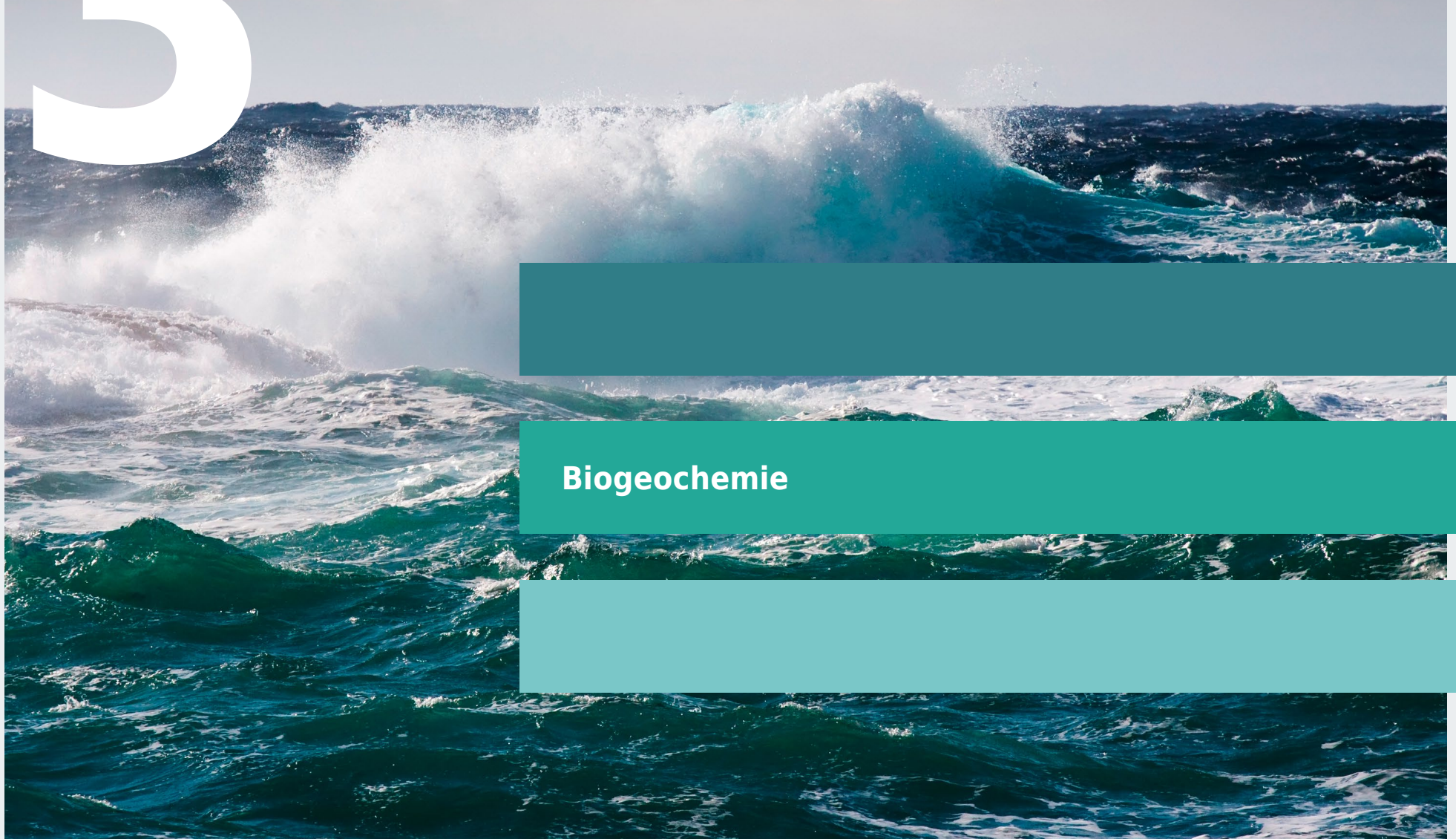
▲ Abb. 3.9-2: Beispiel für die Abdeckung der am VOS-System teilnehmenden Hochseeschiffe auf monatlicher (rot, September 2018) und jährlicher (blau, 2017) Basis (Quelle: GEOMAR nach Smith et al. 2019)

für das In-situ-Messnetz sind Referenzmessungen, insbesondere zur Validierung von atmosphärischen Reanalyse-daten. Zurzeit liefern ca. 600 Schiffe im Rahmen der VOS-Aktivitäten des DWD Daten, die eine Berechnung der ECVs erlauben, die für eine Bestimmung der turbulenten Wärmeflüsse notwendig

sind. Auf den deutschen Forschungsschiffen werden typischerweise Messungen durchgeführt, die alle vier Komponenten berechenbar machen. Die Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee (FINO) bieten sich für ausge-dehnte Prozessstudien zur Parametrisierung an.

3

Ozeanische Beobachtungen



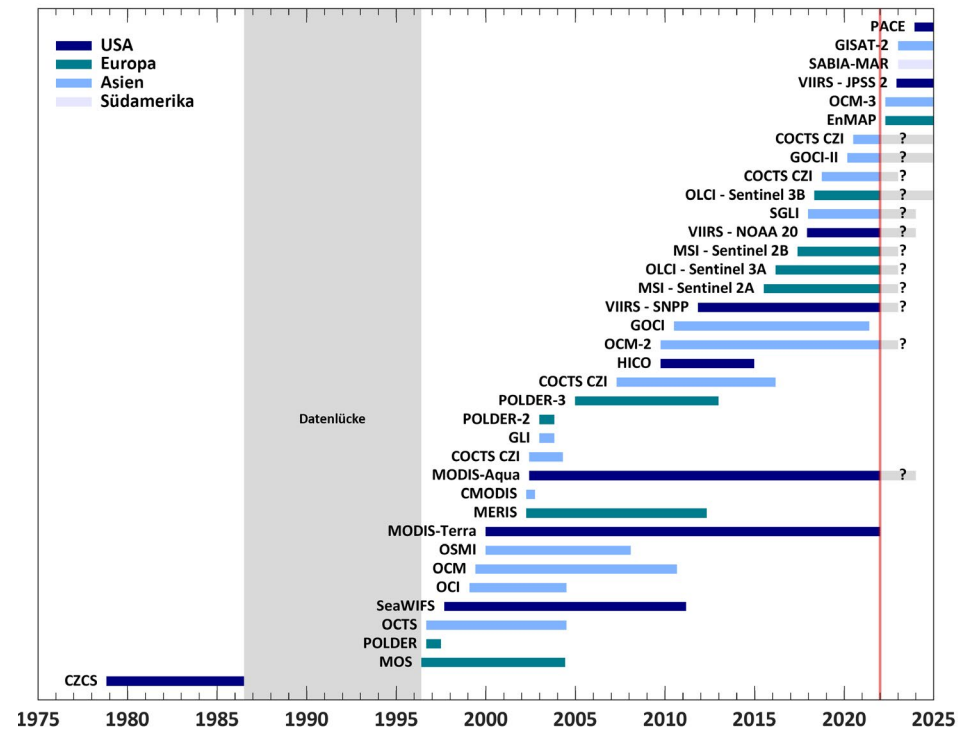
Biogeochemie

3.10 Biomasse/Ocean Colour

»Ocean Colour« (OC) ist ein Sammelbegriff für verschiedene physikalische und biologische Parameter, die aus multispektralen optischen Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Zu den wichtigsten Parametern für die Ozeanüberwachung gehören die Chlorophyll-, Schwebstoff- und Gelbstoffkonzentrationen sowie Trübung und Sichttiefe. Die besondere Bedeutung für die Meeresüberwachung liegt in der regelmäßig verfügbaren Information über die räumliche und zeitliche Variabilität dieser Parameter. Dies ermöglicht zum Beispiel die Erfassung und Bewertung anthropogener und klimabedingter Veränderungen im Meer und der dadurch bedingten ökologischen Veränderungen.



Globale »Ocean Colour«-Satellitenmissionen



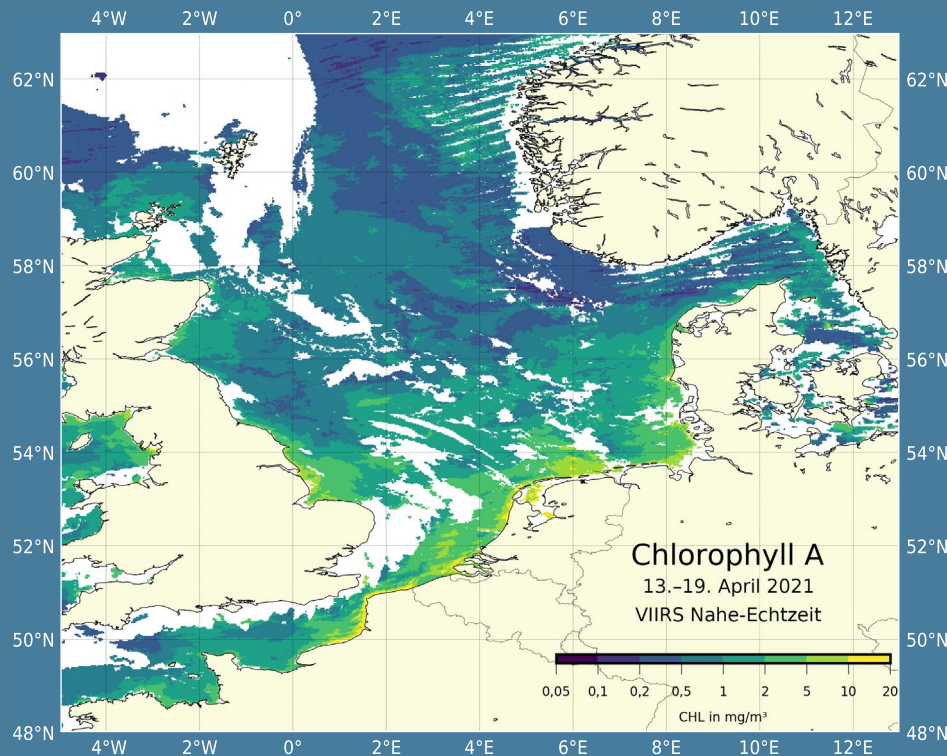
▲ Abb. 3.10-1: Zeitleiste für vergangene, aktuelle und zukünftige globale »Ocean Colour«-Satellitenmissionen (Quelle: BSH nach IOCCG)

◀ Foto 3.10-1: Algenblüte in der Nordsee

Klimasignale

Die optische Fernerkundung mit Satelliten begann Ende der 1970er-Jahre, eine größere Vielzahl von optischen Sensoren ist seit etwa 20–25 Jahren, insbesondere nun auch durch die europäischen Copernicus-Dienste, verfügbar (siehe Abb. 3.10-1). Dies ermöglicht die Synthese von konsistenten, auf unterschiedlichen Satelliten basierenden Zeitreihen. Dies ist für die Untersuchung klimabedingter Veränderungen

im Meer unbedingt notwendig, da ein hinreichend langer Zeitraum erfasst werden muss, wenn Klimasignale identifiziert werden sollen. Da bei den OC-Messungen aber nur der oberflächennahe Bereich erfasst wird, ist – insbesondere bei lokalen Untersuchungen – die Trennung von Klimatrends und natürlicher, zum Teil multidekadischer Variabilität oft nur schwer zu realisieren.



▲ Abb. 3.10-2: Chlorophyll-A-Verteilung in der Nordsee, Wochenmittel 13.-19.04.2021 (Quelle: BSH)

Wo wird gemessen?

Generell sind OC-Produkte weltweit verfügbar für den offenen Ozean und die Küstengebiete. Die verschiedenen Sensoren der Satelliten haben unterschiedliche räumliche Auflösungen. Bedingt durch die Umlaufbahnen der Satelliten

bzw. die Flächenabdeckung der geostationären Satelliten werden zur Erstellung großräumiger Produkte für ganze Meeresgebiete die Daten mehrerer Satelliten zusammen verarbeitet. Ein Beispiel für die Nordseeregion ist in Abbildung 3.10-2 gezeigt.

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Ein Großteil der OC-Produkte wurde im Rahmen von internationalen Projekten (z. B. ESA, EUMETSAT) entwickelt und wird direkt oder über lokale Serviceprovider (DLR, Forschungsinstitute und private Firmen) betrieben. Im Rahmen des marinen Copernicus-Dienstes CMEMS (Copernicus Marine Service) stellt das europäische Ocean Colour Thematic Assembly Center (OC TAC) globale, paneuropäische und regionale (Atlantik, Arktis, Nord- und Ostsee, Schwarzes Meer) High-Level-Produkte operationell zur Verfügung. Daten sind über die unten aufgeführten Links abrufbar.

Um den Zugang zu diesen Daten zu erleichtern und zu vereinheitlichen, finanziert die Europäische Kommission die Einrichtung von fünf cloudbasierten Plattformen, die einen zentralen Zugriff auf die Copernicus-Daten und -Informationen sowie auf Verarbeitungstools bieten.

Gesetzliche Grundlagen

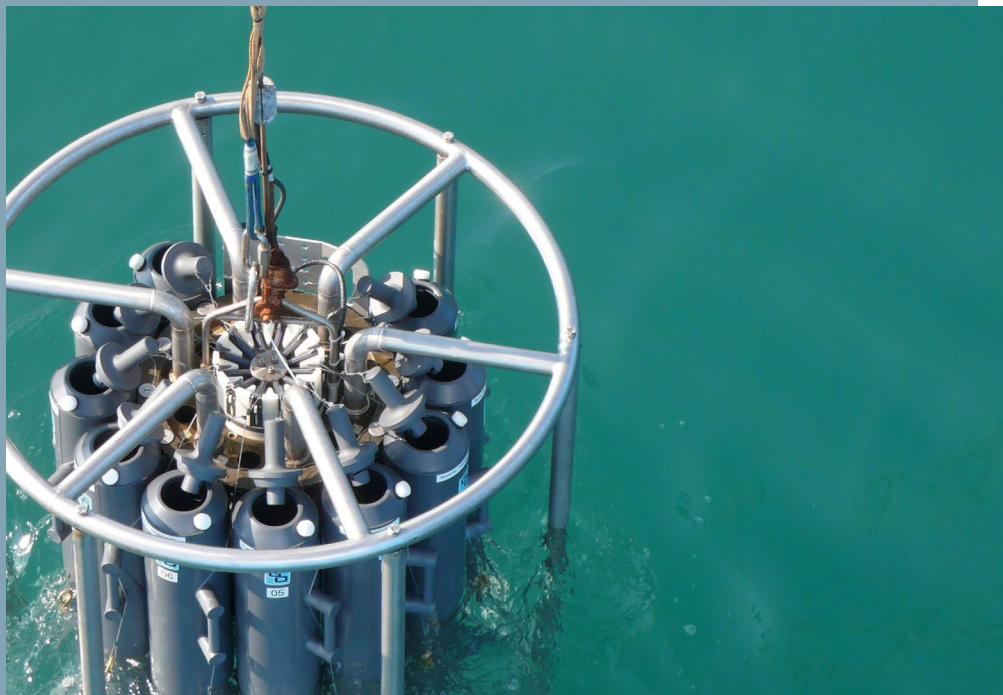
Gemäß dem Seeaufgabengesetz ist die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, meereskundliche Untersuchungen einschließlich der Überwachung auf Veränderungen der Meeresumwelt durchzuführen. Hierzu gehört auch die Mitwirkung an Inspektionen der Europäischen Gemeinschaften oder internationaler Organisationen, deren Mitglied die Bundesrepublik Deutschland ist, soweit diese zur Durchführung von Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaft oder zur Erfüllung völkerrechtlicher Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland im Anwendungsbereich dieses Gesetzes erforderlich ist.

Woher kommen die Ressourcen?

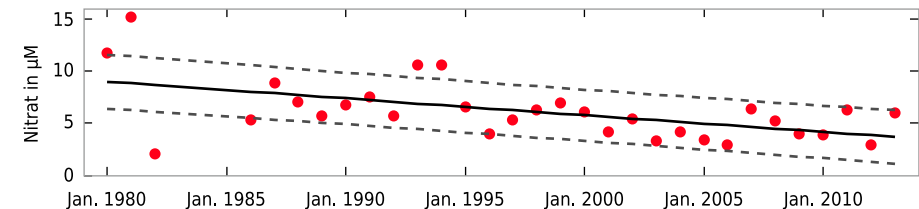
Die nationale Überwachung der Meeresumwelt ist in Deutschland durch das Seeaufgabengesetz gesichert. Zusätzlich sind die nationalen Verpflichtungen im Rahmen des Bund/Länder-Messprogramms und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie geregelt, die internationalen Verbindlichkeiten im Rahmen der OSPAR-Konvention und der Helsinki-Kommission (HELCOM). Die zentrale Bereitstellung der OC-Produkte auf europäischer Ebene durch CMEMS wird durch die EU finanziert.

3.11 Nährstoffe

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen ist Grundvoraussetzung für das Wachstum von Pflanzen im Meer. Nährstoffe sind in Stoffkreisläufe eingebunden und damit von biologischen, biogeochemischen und physikalischen Prozessen abhängig. Konsequenterweise können Klimaschwankungen auf vielfältige Weise Nährstoffe und deren Stoffkreisläufe stören, aber auch weitere anthropogene Störungen (z. B. Eutrophierung) beeinflussen Nährstoffe nachhaltig. Das Messnetz für Nährstoffe setzt sich aus großräumigen und regionalen Beobachtungen gleichermaßen zusammen.



Langzeittrends an der Boknis-Eck-Zeitserienstation



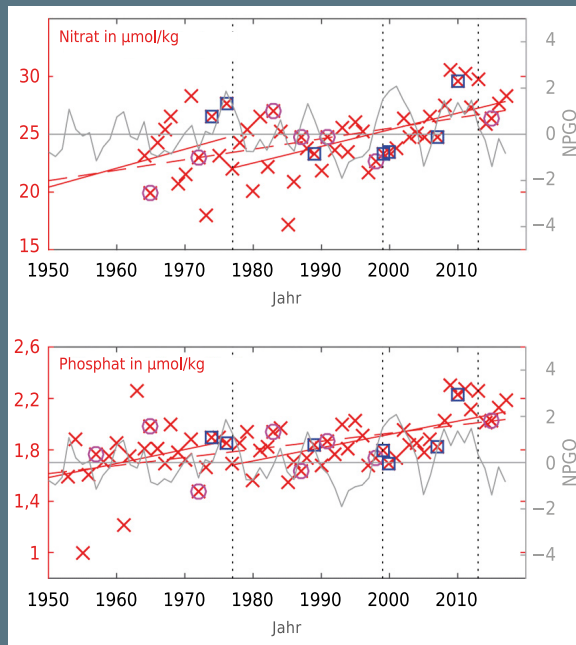
▲ Abb. 3.11-1: Mittlere Winterkonzentration von Nitrat an der Boknis-Eck-Zeitserienstation (Punkte). Der errechnete Langzeittrend (durchgezogene Linie) und dessen Unsicherheit (gestrichelte Linie) sind ebenfalls gezeigt. (Quelle: GEOMAR nach Lennartz et al. 2014)

Klimasignale

Für das Prozessverständnis und die Verbesserung von Vorhersagekapazitäten ist eine Erfassung mit biologischen und physikalischen Essential Climate Variables (ECVs) dringend zu empfehlen. Zusätzlich zur Überwachung des Nährstoffgehalts im Meer ist die Beobachtung auch in den Flüssen wichtig.

Im Küstenbereich erfordern die großen saisonalen Schwankungen der Nährstoffkonzentrationen eine regelmäßige Überwachung über lange Zeiträume, um Trends zu erkennen. An der Zeitserienstation Boknis Eck in der Ostsee, an der Nährstoffe seit 1986 kontinuierlich gemessen werden, ist ein abnehmender Trend der Nährstoffkonzentrationen im Winter zu erkennen (Abb. 3.11-1). Ähnliche Trends werden auch in der Deutschen Bucht beobachtet und sind hauptsächlich auf eine Abnahme des Nährstoffeintrags durch Flüsse zurückzuführen. Doch auch die zunehmende Schichtung (Dichteunterschied zwischen tiefem und flachem Wasser) aufgrund der Klimaerwärmung ist als einflussnehmender Faktor nicht ausgeschlossen.

Aufgrund der oftmals nur geringen Konzentrationen sind Trends im offenen Ozean schwerer zu detektieren und von zentraler Bedeutung ist es, die Vergleichbarkeit der Messungen durch geeignetes Referenzmaterial (RM) zu gewährleisten. RM für viele Nährstoffe wurde schon früh entwickelt, jedoch nur auf lokaler Ebene, und global akzeptierte Standards liegen erst seit einigen Jahren vor. Gleiches gilt für Methodendokumente. Durch Interkalibrierung ist es möglich, systematische Abweichungen in Nährstoffdaten zu identifizieren und eventuell auch zu korrigieren.



◀ Abb. 3.11-2: Trends von Nitrat (oben) und Phosphat (unten) am Beispiel der Oyashio-Region im Nordpazifik. Die Trendlinien wurden für bestimmte Phasen der Pazifischen Dekadischen Oszillation (PDO) und der Lage des Nordpazifischen Wirbels (NPGO) ins Verhältnis gesetzt, da großskalige Verlagerung dieser Meeresströmungen als Mitverursacher der Trends angesehen werden. Quelle: GEOMAR nach Stramma et al. 2020

Wo wird gemessen?

In der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) werden Langzeit-Nährstoffmessungen als Teil des regelmäßigen Monitoring der Deutschen Bucht durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt. Auch werden von Forschungsinstituten und Universitäten Langzeitmessungen im Küstenbereich der Ostsee durch das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) sowie das GEOMAR und in der Nordsee

durch die Universität Oldenburg und das Alfred-Wegener-Institut (AWI) durchgeführt. Durch die Landesämter erfolgen regelmäßig Messungen der Nährstoffeinträge in die Küstenregionen durch Flüsse.

Im offenen Ozean finden Nährstoffmessungen weltweit meist schiffsbasiert und als Teil von Forschungsprojekten durch Institutionen und Universitäten statt. Langzeittrends lassen sich über die Verbindung von Daten aus vielen Ländern ableiten (Abb. 3.11-2).

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Die Zusammenarbeit bei der Nährstoffüberwachung im Ostseeraum wird durch die Helsinki-Kommission (HELCOM) koordiniert, die in der Nordsee durch die OSPAR-Kommission. Hierbei werden hauptsächlich Schiffe genutzt. Neue Sensorik erlaubt es, einige Nährstoffe mit hohen Datenraten auch an autonomen Messplattformen (Unterwasser-gleiter, Argo-Tiefendrifter, Verankerungen) zu messen. Den höchsten Qualitätsstandard erreichenden Messungen im Labor auf Forschungsschiffen etwa im Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP), in dem sich auch Deutschland regelmäßig beteiligt. Die GO-SHIP-Daten werden als Referenz für Klimatrends genutzt, auch über die angebundene Datensynthese GLODAP. Internationale Arbeitsgruppen (z. B. SCOR COMONUT) arbeiten an der Homogenisierung von Techniken und RM.

Ein Großteil der Nährstoffdaten aus Beobachtungen in der deutschen AWZ ist auf dem Chemieportal des European Marine Observation and Data Network (EMODnet) zu finden. Andere Daten sind über Institute öffentlich verfügbar wie etwa die Boknis-Eck-Zeitreihe, die seit Mitte der 50er-Jahre vom jetzigen GEOMAR in der Ostsee betrieben wird. Für den offenen Ozean sind zusätzlich auch Daten bei PANGAEA® zu finden (siehe Linksammlung unten).

Woher kommen die Ressourcen?

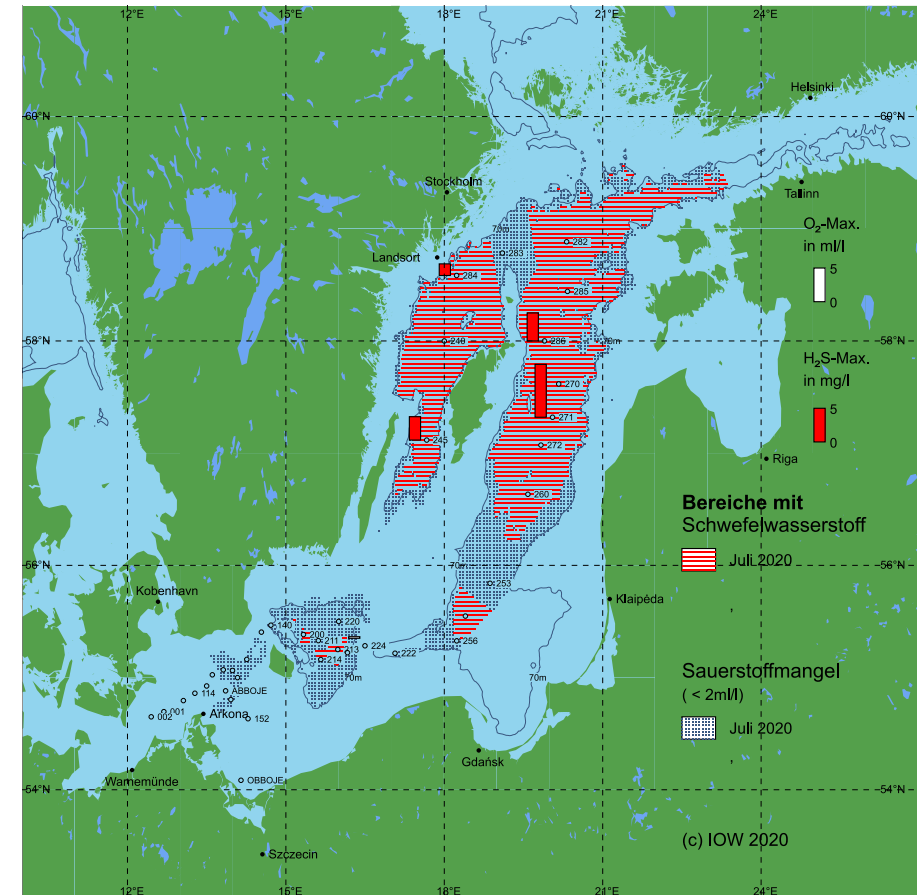
Die Überwachung der Meeresumwelt ist im Rahmen des Seeaufgabengesetzes gesichert. Zusätzlich sind die nationalen Verpflichtungen im Rahmen des Bund/Länder-Messprogramms geregelt und die internationalen Vereinbarungen im Rahmen der OSPAR-Konvention. Ein abgestimmtes Messprogramm für die EU ist in die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie eingebunden. Nährstoffbeobachtungen in internationalen Gewässern werden hauptsächlich durch kurzfristige Forschungsgelder finanziert.

3.12 Sauerstoff

Gelöster Sauerstoff im Wasser ist die Voraussetzung für alles höhere Leben im Meer. Der Vorrat des gelösten Sauerstoffs im Wasser ist sehr viel kleiner als der in der Luft. Ein Liter Wasser enthält nur ca. 1/20 der Sauerstoffmenge, die im gleichen Volumen Luft enthalten ist. Das Oberflächenwasser ist in der Regel gut mit Sauerstoff versorgt. Während des Algenwachstums im Frühjahr kommt es meist zu Sauerstoffübersättigung. In tieferen Schichten und Bodennähe können in der zweiten Jahreshälfte Sauerstoffmangelsituationen auftreten, hervorgerufen durch sauerstoffzehrende Abbauprozesse von biologischem Material.



Bereiche mit Sauerstoffmangel bzw. Anoxie in Bodennähe in der Ostsee im Juli 2020

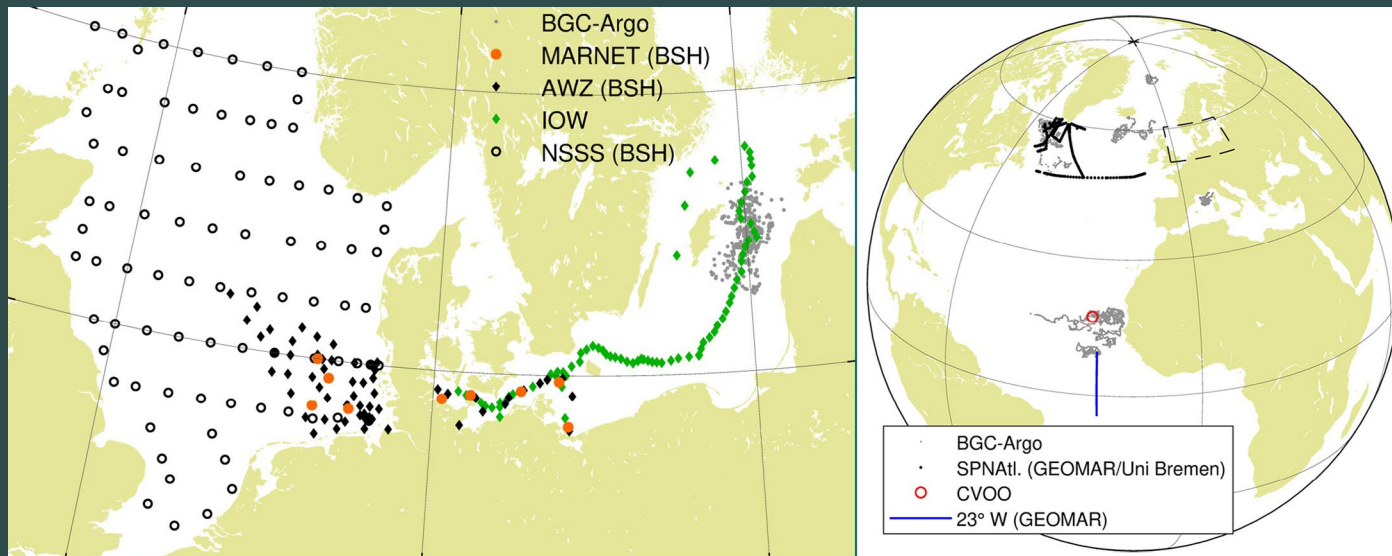


▲ Abb. 3.12-1: Verteilung von Regionen mit Sauerstoffmangel in Bodennähe (schwarz gepunktet) bzw. von H₂S und damit anoxischen Bedingungen (rot schraffiert) in der Ostsee im Juli 2020 (Quelle: Naumann/IOW)

Klimasignale

Die Sauerstoffdynamik im Ozean wird sowohl durch physikalische, biogeochemische als auch biologische Prozesse bestimmt. Durch Photosynthese sowie durch Gasaustausch mit der Atmosphäre bei unersättigtem Oberflächenwasser

erhöht sich der Sauerstoffgehalt. Durch Atmung und die Oxidation chemischer Verbindungen in der Wassersäule bzw. im Sediment verringert sich der Sauerstoffgehalt. Während die gut durchmischte oberflächennähe so ■■■



▲ Abb. 3.12-2: Übersicht über das Sauerstoff-Messnetz bestehend aus (a) kontinuierlichen Messungen (gefüllte Punkte), (b) saisonalen Messungen (gefüllte Rauten) sowie (c) Messungen im (mehr-)jährlichen Rhythmus (offene Kreise). Die Farbe gibt dabei das Messprogramm bzw. die verantwortliche Institution an. (Quelle: Bittig/IOW)

Wo wird gemessen?

Die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) in Nord- und Ostsee ist durch automatisierte MARNET-Messstationen ganzjährig an bestimmten Schlüsselstellen abgedeckt. Dazu kommen bis zu fünf Mal pro Jahr Monitoringfahrten, die in der Nordsee durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und in der Ostsee durch das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) im Auftrag des BSH durchgeführt werden. Als Teil des IOW-Langzeitprogramms

werden diese Fahrten bis in die zentrale Ostsee hinein ausgedehnt und liefern somit ein umfangreiches Bild der saisonalen Sauerstoffentwicklung und des Ökosystemzustands der gesamten westlichen und zentralen Ostsee. In der Nordsee wird der großräumigere Kontext mithilfe eines sommerlichen »North Sea Summer Survey (NSSS)« durch das BSH aufgenommen. Darüber hinaus bestehen aus langjährigen Forschungsinteressen z. B. des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel oder der Universität

Bremen Zeitserien der Sauerstoffentwicklung im subpolaren Nordatlantik und der Labradorsee, im äquatorialen Atlantik sowie im subtropischen Nordostatlantik. Ein wichtiger Bestandteil ist hierbei das gemeinsam mit Partnern auf den Kapverden unterhaltene Cape Verde Ocean Observatory (CVOO) als Zeitserienstation. In allen zuvor genannten Gebieten außer der Nordsee finden darüber hinaus Sauerstoffmessungen durch deutsche biogeochemische Argo-Floats (BGC-Argo) statt.

■■■

meist gut mit Sauerstoff versorgt ist, braucht es unterhalb der sonnenbeschienenen Oberfläche einen physikalischen Transportmechanismus, die sogenannte Ozeanventilation, um verbrauchten Sauerstoff zu erneuern. Die Verteilung von Sauerstoff im Inneren des Ozeans liefert somit Informationen über physikalische und biogeochemische Mechanismen im Ozean sowie über den ökologischen Zustand der Meere.

Durch den Klimawandel erwärmt sich der Ozean nicht nur, auch die Ozeanzirkulation reagiert darauf. Beides führt – über eine reduzierte Sauerstofflöslichkeit und über eine verringerte Ozeanventilation – zu einer Abnahme des globalen Sauerstoffinventars, die bereits messbar ist: Seit 1960 hat das Sauerstoffinventar global mehr als 2% abgenommen. Eine zunehmende Erwärmung und damit verbundene stärkere Schichtung in der Wassersäule sowie die Eutrophierung insbesondere von Küstengewässern bewirken darüber hinaus, dass an immer mehr Stellen Hypoxie, d. h. Sauerstoffarmut, beobachtet wird.

Eine ähnliche Situation zeigt sich auch in der nahezu vollständig von Land umgebenen Ostsee, mit nur schmalen Meerengen als Verbindung zum Weltmeer und daraus resultierend geringem Wasseraustausch. Die von Hypoxie betroffene Fläche beträgt aktuell etwa 70.000 km² im Tiefenwasser der zentralen Becken. In küstennahen, flachen Bereichen tritt im Spätsommer vermehrt Sauerstoffmangel auf. Trotz erheblicher Reduktion von Nährstofffrachten seit Beginn der 1980er-Jahre sind aktu- ■■■



ell berechnete Sauerstoffzehrungs-raten deutlich höher als in vorherigen Dekaden. In einigen wenigen Küstenbereichen mit stark verminderten Nährstofffrachten und geringer Ansammlung von organischem Material sind jedoch auch Verbesserungen sichtbar. Die weitere Erwärmung treibt auch in Randmeeren wie der Ostsee weitere Sauerstoffverarmung an. Die zukünftige Entwicklung der von Sauerstoffmangel betroffenen Fläche ist stark gekoppelt an das Szenario des zukünftigen Nährstoffeintrags. Bei weiterer Reduktion zeigen Simulationen mit voller Implementierung des Baltic Sea Action Plan sogar zukünftige Verbesserungen des ökologischen Zustands.

Gesetzliche Grundlagen

Gemäß Seeaufgabengesetz § 1 Nr. 9, 11, § 5 Abs. 1 Nr. 4, 5 in der Fassung vom 26.07.2002 (BGBl I 2876) wird die Meeresumwelt der Nord- und Ostsee durch den Bund und die Länder der Bundesrepublik Deutschland überwacht. Die deutsche AWZ liegt dabei im Kompetenzbereich des Bundes, wobei die chemische und physikalische Überwachung im Verantwortungsbereich des BSH als untergeordnete Behörde des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) liegt und zur Beurteilung der Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie dient. Das Monitoring im Ostseeraum bzw. im Atlantik fließt in die Bewertung des ökologischen Zustands im Rahmen der Helsinki-Konvention (unter HELCOM) bzw. der OSPAR-Konvention mit ein.

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Alle Messdaten der Monitoringprogramme sowie von Forschungsfahrten sind in entsprechenden Datenbanken (z. T. nach einer gewissen Embargo-Zeit) frei verfügbar. Daten der Umweltüberwachung werden i. d. R. an den International Council for the Exploration of the Sea (ICES) weitergeleitet. BGC-Argo-Daten sind beim Argo-Datenzentrum frei verfügbar. Die Hinterlegung weiterer Daten (z. B. von Forschungsfahrten) erfolgt je nach Herkunft an verschiedenen Orten (z. B. bei PANGAEA®). Eine Übersicht bietet die Fahrtinventur und Datenrecherche des Deutschen Ozeanographischen Datenzentrums am BSH. Um die Auffindbarkeit und den Zugriff zu vereinfachen, gibt es aktuell internationale Bestrebungen, einen umfassenden Global Ocean Oxygen Database and Atlas (GO₂DAT) aufzubauen und den Datenstrom von der Messung über nationale Datenzentren und andere Datenprovider hin zu solch einem einheitlichen Datenprodukt zu etablieren.

Woher kommen die Ressourcen?

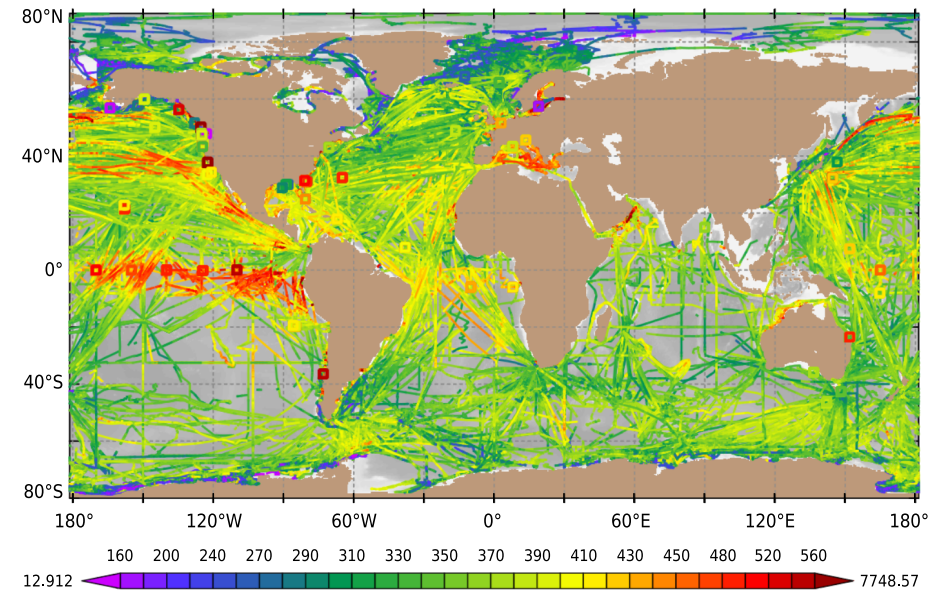
Die Überwachung der Sauerstoffsituation in der Meeresumwelt innerhalb der AWZ ist durch das Seeaufgabengesetz gesichert. Die nationalen Verpflichtungen sind im Bund/Länder-Messprogramm verankert und werden zukünftig in das international abgestimmte Messprogramm der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie eingebunden. Darüber hinausgehende Messungen werden aus dem Haushalt der beteiligten Forschungsinstitute (z. B. IOW) bzw. aus Forschungsmitteln (z. B. GEOMAR, Universität Bremen) finanziert. Das deutsche Argo-Programm wird durch das BMDV, die Erweiterung auf Sauerstoff- und weitere biogeochemische Parameter derzeit durch Mittel des BMBF finanziert.

3.13 Anorganischer Kohlenstoff im Meer

Die Beobachtung des marinen Kohlenstoffkreislaufs zählt zu den großen Aufgaben der Meeresforschung. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Aufnahme und Speicherung von anthropogenem Kohlendioxid (CO₂), den Veränderungen im natürlichen Kohlenstoffkreislauf, die durch den Klimawandel und andere anthropogene Einflüsse hervorgerufen werden, sowie den Auswirkungen der CO₂-Aufnahme auf marine Ökosysteme.



Messungen des CO₂-Partialdrucks im Ozean



▲ Abb. 3.13-1: Karte der in SOCATv2022 enthaltenen qualitätskontrollierten 33,7 Millionen Messungen des CO₂-Partialdrucks im Oberflächenozean aus dem Zeitraum 1957–2021 (Quelle: DWD nach Bakker et al. 2016)

◀ Foto 3.13-1: Ein unbemannter und mit modernster Sensorik ausgestatteter Segelroboter vom Typ Saildrone begegnet im tropischen Nordatlantik dem deutschen Forschungsschiff METEOR im Rahmen einer konzertierten Aktion während der Forschungsexpedition M160 zur Rolle von Ozeanwirbeln im marinen Kohlenstoffkreislauf.

Anthropogen gestörter Kohlenstoffkreislauf

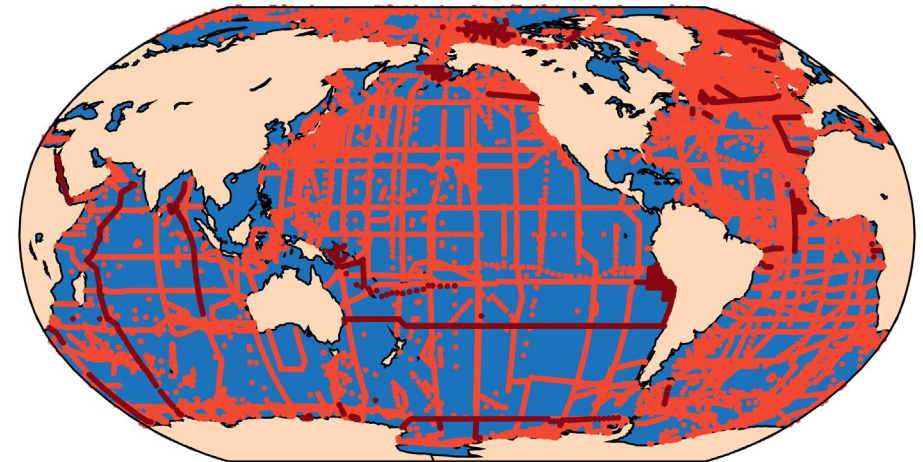
Der Ozean spielt eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. So hat er im Zeitraum 2010–2019 etwa 26 % des in diesem Zeitraum durch Verbrennung fossiler Brennstoffe weltweit emittierten CO₂ aufgenommen. Kumulativ liegt der Anteil an den Emissionen seit 1750 sogar bei 38 %. Zugleich führt diese zusätzliche CO₂-Aufnahme zu Veränderungen im Chemismus des anorganischen Kohlenstoffsystems, die das

Leben im Meer in vielfältiger und potenziell negativer Weise beeinflussen. Diese Veränderungen sind vor allem unter dem Stichwort »Ozeanversauerung« bekannt. Die systematische Beobachtung des marinen CO₂-Systems ist daher wissenschaftlich von großer Bedeutung und zudem durch Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland in internationalen Abkommen (UNFCCC, OSPAR, MSRL) geboten.

Datenprodukte

Daten zum anorganischen Kohlenstoff im Ozean werden seit über zwei Jahrzehnten systematisch und unter strengen, international vereinbarten Protokollen zur Sicherung hoher Qualität erhoben. Daraus sind mehrere internationale Datenprodukte entstanden, die öffentlich verfügbar, auffindbar und zitierfähig sind und zu denen deutsche Forschergruppen sowohl konzeptionell als auch durch regelmäßige Bereitstellung von Daten beitragen. Prominente Beispiele sind der Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT, siehe Abb. 3.13-1 und Link am Ende des Beitrags) und das Global Ocean Data Analysis Project

(GLODAP, siehe Abb. 3.13-2 und Link am Ende des Beitrags). Die SOCAT-Version 2022 umfasst 33,7 Millionen qualitätskontrollierte Messungen des CO₂-Partialdrucks im Oberflächenozean aus dem Zeitraum 1957–2021. Die GLODAP-Version 2.2021 umfasst qualitätskontrollierte und intern konsistente Daten zu CO₂-Messgrößen von 1,3 Millionen Wasserproben, die auf 989 Expeditionen im Zeitraum 1972–2020 gewonnen wurden. Beide Datenprodukte werden routinemäßig zur jährlichen Erstellung des prominenten Global Carbon Budget herangezogen.



▲ Abb. 3.13-2: Karte der hydrographischen Stationen mit qualitätskontrollierten und intern konsistenten Messungen biogeochemischer Messgrößen (inkl. Kohlenstoffmessungen) an mehr als 1,3 Millionen Wasserproben von 989 Forschungsexpeditionen aus dem Zeitraum 1972–2020 (Quelle: Lauvset et al. 2016 und 2021, Key et al. 2015)

Wo wird gemessen?

Systematische Beobachtungen des anorganischen Kohlenstoffs im Ozean werden dabei aufgrund der vielfältigen wissenschaftlichen Anforderungen in verschiedenen Netzwerken durchgeführt. Die drei wichtigsten sind im Folgenden aufgeführt:

»Ship-of-Opportunity«-Netzwerk (SOOP)

Das globale Observatorium für CO₂-Beobachtungen im Oberflächenozean basiert überwiegend auf Schiffen der kommerziellen Schifffahrt (Containerschiffe, Fähren) und bildet die Basis für die Quantifizierung der ozeanischen CO₂-

Senke. Der deutsche Beitrag (ICOS) umfasst drei derartige SOOP-Linien in der Ostsee (IOW), dem Nordatlantik (GEOMAR) und den Polarregionen (AWI), auf denen kontinuierlich automatische Messungen des CO₂-Partialdrucks und weiterer Größen durchgeführt werden. Die Daten gehen routinemäßig und qualitätskontrolliert in die internationale SOCAT-Datenbank ein.

Netzwerk der ozeanischen Zeitserienstationen

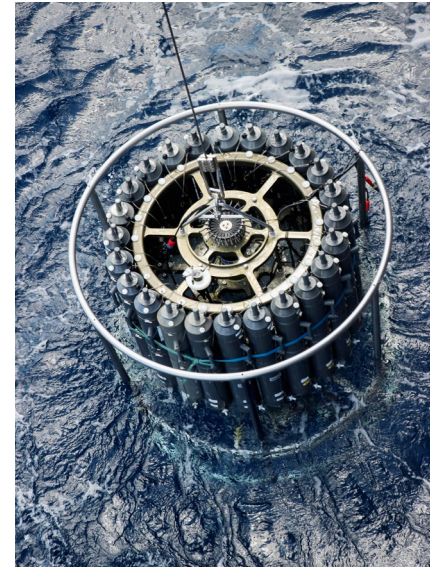
Ozeanische Zeitserienstationen geben Einblicke in die natürliche Variabilität des marinen CO₂-Systems und erlauben die zweifelsfreie Identifikation zeitlicher

Trends, wie für die Stationen BATS, ESTOC und HOT gezeigt werden konnte (OceanSITES). Der deutsche Beitrag (ICOS) umfasst zwei derartige Stationen in der Framstraße (Hausgarten, AWI) sowie im tropischen Nordostatlantik (Cape Verde Ocean Observatory, GEOMAR). Ein konsistentes internationales Datenprodukt der ozeanischen Zeitserienstationen ist zurzeit unter Leitung des GEOMAR in Arbeit.

Globales Argo-Float-Observatorium

Das überaus erfolgreiche globale Observatorium von profilierenden Tiefendriftern (»Floats«) wird um eine biogeochemische Komponente erweitert

(BGC-Argo). Durch die neue pH-Sensortechnologie sind damit erstmals autonome profilierende Messungen des marinen CO₂-Systems in den oberen 2.000 Metern des Ozeans möglich. Der deutsche Beitrag umfasst sowohl methodische Arbeiten als auch regionale Pilotstudien im subpolaren Nordatlantik (BSH, GEOMAR) und in der Ostsee (BSH, IOW).



◀ Foto 3.13-3: Ein Kranzwasserschöpfer kommt mit 24 geschlossenen Wasserschöpfnern aus über 4.000 Metern Wassertiefe zurück an die Oberfläche.

Woher kommen die Ressourcen?

Der deutsche ICOS-Beitrag wurde im Zeitraum 2012–2016 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aufgebaut. In der seit 2017 laufenden operationellen Phase wird das Atmosphärenprogramm vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) finanziert, während das Ozeanprogramm gegenwärtig aus Eigenmitteln der Partnerinstitutionen GEOMAR, AWI und IOW bestritten wird. Das deutsche Argo-Programm wird operationell vom BMDV finanziert. Für den weiteren Ausbau, die methodische Erneuerung und flankierende Forschung spielen BMBF-Projektmittel jedoch weiterhin eine entscheidende Rolle. Mittelfristig ist eine stärkere Übernahme der Beobachtungsaufgaben im Bereich des anorganischen Kohlenstoffs im Ozean in den Bereich der hoheitlichen Finanzierung erforderlich, um die aufgebauten Strukturen und Expertisen nachhaltig zu sichern.

Internationale Einbettung

Beteiligte deutsche Forschergruppen sind in internationale Initiativen wie SOCAT, GLODAP und IOCCP eingebunden und übernehmen dort auch Leitungsaufgaben. Hervorzuheben sind die Beiträge zur europäischen Forschungsinfrastruktur ICOS (Integrated Carbon Observation System) zur Quantifizierung der Treibhausgasbilanz Europas, zu denen Deutschland auch fünf Komponenten zum Ozean-Netzwerk beiträgt.

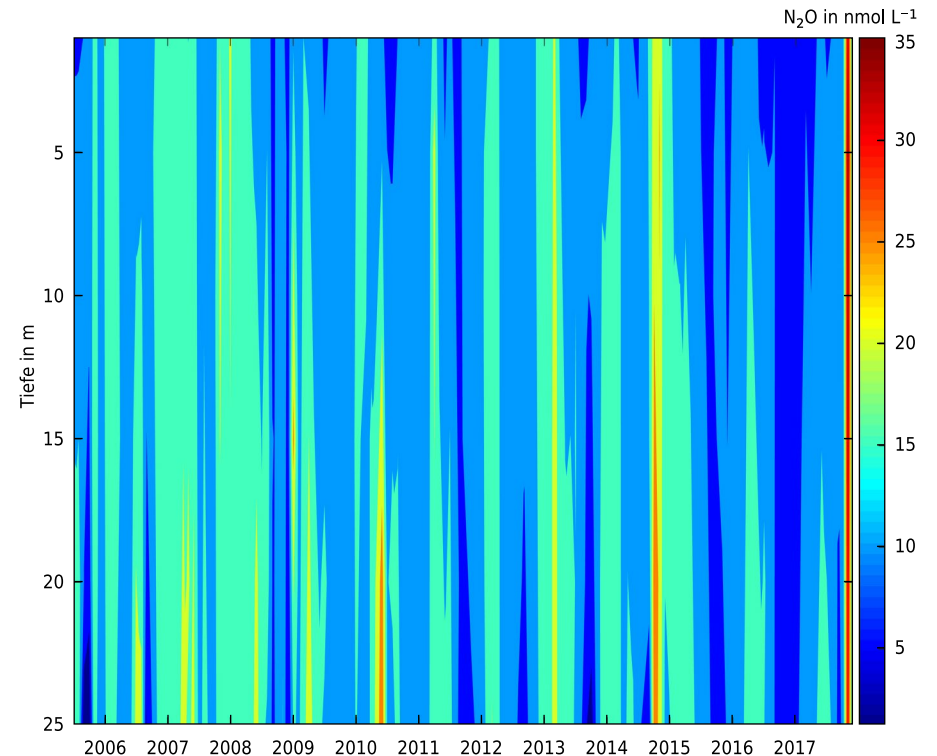
◀ Foto 3.13-2: Dr. Björn Fiedler vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel bereitet Argo-Tiefendrifter mit verschiedenen biogeochemischen Sensoren für die Auslegung im tropischen Atlantik vor.

3.14 Lachgas (N_2O) im Ozean

N_2O ist ein langlebiges Spurengas, das den drittgrößten Beitrag zum Treibhauseffekt leistet und eine entscheidende Rolle im Abbau von stratosphärischem Ozon spielt. Derzeit sind ca. 60 % der globalen N_2O -Emissionen auf natürliche Quellen zurückzuführen, wobei der Ozean ein Drittel beiträgt. Aufgrund fehlender Beobachtungen und nur teilweise erfasster natürlicher Variabilität bestehen nach wie vor große Unsicherheiten in der Abschätzung der marinen N_2O -Emissionen. In diesem Zusammenhang sind Langzeitmessungen eine wichtige Komponente von internationalen Messnetzwerken für Essential Climate Variables (ECVs).



Messungen von N_2O in der Wassersäule bei der Zeitserienstation Boknis Eck 2005-2017



▲ Abb. 3.14-1: Monatliche Messungen von N_2O in der Wassersäule (5–25 m Tiefe) bei der Boknis-Eck-Zeitserienstation zwischen 2005 und 2017. Hohe Konzentrationen von N_2O sind als gelb-rötliche Töne zu erkennen und niedrige als blaue Töne. (Quelle: GEOMAR nach Ma et al. 2019)

◀ Foto 3.14-1: Deutscher Forschungskutter LITTORINA auf dem Weg zu Boknis Eck in der Eckernförder Bucht (Schleswig-Holstein)

Klimasignale

Die atmosphärischen N_2O -Gehalte sind in den letzten Jahren nahezu kontinuierlich um ca. 0,8 ppb pro Jahr gestiegen. Dies spiegelt die steigenden N_2O -Emissionen aus anthropogenen Quellen wider.

Lachgas wird als Zwischen- bzw. Nebenprodukt bei Umwandlungsprozessen im Stickstoffkreislauf produziert.

Erhöhte N_2O -Emissionen lassen sich einerseits häufig auf Eutrophierungsprozesse zurückführen, andererseits besteht eine enge Kopplung der N_2O -Produktion mit dem Sauerstoffgehalt der Umgebung. Verschiedene Studien zur Sauerstoffabhängigkeit der N_2O -Produktion zeigen, dass bei sehr niedrigen Sauerstoffgehalten am ■■■

meisten N₂O entsteht, es aber zu einem N₂O-Abbau kommt, wenn kein Sauerstoff mehr zur Verfügung steht. Veränderungen im Sauerstoffhaushalt von Gewässern haben somit einen direkten Einfluss auf die N₂O-Verteilung. Allerdings hängt die Entwicklung der N₂O-Emissionen maßgeblich von den physikalischen Austauschprozessen zwischen Gewässer und Atmosphäre ab.

Ergebnisse der Zeitserienmessungen an Boknis Eck zeigen, dass in den Küstengewässern der südlichen Ostsee die Eutrophierung in den letzten Jahrzehnten abgenommen hat. Gleichzeitig haben aber durch Veränderungen in der Schichtung der Wassersäule die Jahre mit ausgeprägtem Sauerstoffmangel im Tiefenwasser zugenommen. Die bisherigen Messungen von N₂O sind noch nicht ausreichend, um zu beurteilen, ob globale Erwärmung, Ozeanversauerung und Eutrophierung in der Summe zu einer Zu- oder Abnahme der natürlichen N₂O-Emissionen führt.

Wo wird gemessen?

Beobachtungen von N₂O in der Atmosphäre werden derzeit durch das Umweltbundesamt (UBA) als Teil des Netzwerks des Global Atmosphere Watch (GAW) und als deutsche Komponente des Integrated Carbon Observation System (ICOS) durchgeführt. Die Messnetzwerke umfassen mehrere Stationen bundesweit, an denen N₂O kontinuierlich gemessen wird. Gleichzeitig werden Messungen von anderen Spurengasen und weiteren relevanten atmosphärischen Variablen durchgeführt, um die Klimagasflüsse in Deutschland bestimmen zu können. Regelmäßige Beobachtungen von N₂O im Bereich der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) erfolgen während schiffsbasierter Monitoring-Fahrten zu festen Zeitserienstationen und durch autonome Messungen an Bord von Handelsschiffen (»Ships of Opportunity«,

SOOP). Monatliche Messungen von N₂O in der Wassersäule (1–25 m Tiefe) bei der Zeitserienstation Boknis Eck (Eckernförder Bucht, 54° 31' N, 10° 02' E) begannen 2005. Die Messungen werden von Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel durchgeführt. Kontinuierliche Messungen von N₂O am Oberflächenwasser werden seit Winter 2020 an Bord einer Fähre durchgeführt, die alle zwei Tage die Hauptbecken der Ostsee auf dem Weg von Travemünde nach Helsinki (Finnland) durchquert (M/V FINNMAID). Diese Beobachtungen werden durch das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) im Rahmen von ICOS betrieben. In internationalen Gewässern werden N₂O-Messungen mit deutscher Beteiligung zum größten Teil während schiffsbasierter Forschungsexpeditionen durchgeführt.

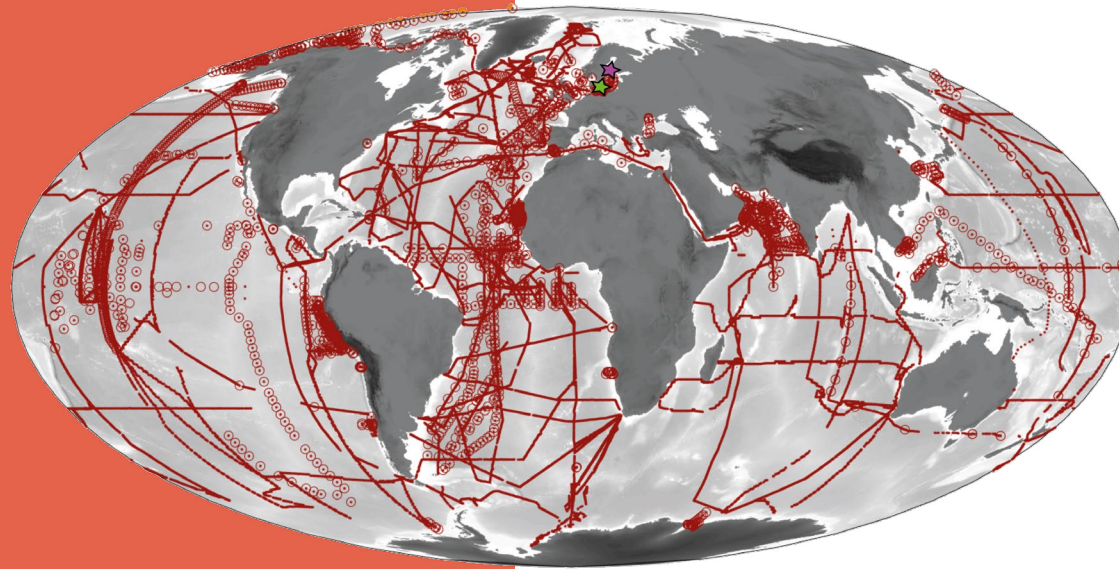


Internationale Einbettung

Die atmosphärischen N₂O-Messungen der von Deutschland betriebenen GAW-Stationen stehen über das Weltdatenzentrum für Treibhausgase (WDCGG) der Öffentlichkeit zur Verfügung. Ozeanische Messungen von N₂O aus nationalen Messkampagnen werden in der Regel zusammen mit anderen während dieser Kampagnen gewonnenen Daten in nationalen bzw. internationalen Geodatenbanken (z. B. PANGAEA®, BCO-DMO) archiviert. Seit 2009 besteht außerdem die Datenbank MEMENTO (MarinE MethanE and NiTrous Oxide) für weltweite ozeanische Methan- und N₂O-Messungen, die vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung betreut wird. In dieser Datenbank werden bestehende Messungen von N₂O aus nationalen und internationalen Kampagnen gesammelt, in ein einheitliches Datenformat überführt und veröffentlicht, um einen umfassenden, einheitlichen Datensatz von N₂O im Ozean zu generieren und globale Abschätzungen der ozeanischen N₂O-Emissionen zu ermöglichen. Abb. 3.14-2 stellt die Positionen der in MEMENTO vorhandenen Oberflächen- und Tiefenprofildaten von N₂O dar (Stand: Dezember 2020).



Die aufgelisteten atmosphärischen Beobachtungen stellen einen wichtigen Beitrag zu internationalen Messprogrammen (GAW, ICOS, Total Carbon Column Observing Network (TCCON), Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC)) und zum Global Carbon Project (GCP) dar. Darüber hinaus sind die bereitgestellten Daten von hoher Relevanz, um die zeitliche Datenabdeckung für N₂O als ECV des Global Ocean Observing System (GOOS) zu erweitern. Durch die Archivierung in globalen Datenzentren wie z. B. dem WDCGG und PANGAEA® wird der öffentliche Zugriff auf die Daten gewährleistet. Die in MEMENTO gesammelten Daten dienen darüber hinaus als Grundlage für die Abschätzung der globalen ozeanischen N₂O-Emissionen. Diese globalen Abschätzungen der N₂O-Emissionen sind eine entscheidende Komponente zur Abschätzung der Treibhausgasbilanz der offenen Ozeane und der Küstengewässer, die innerhalb des GCP erhoben wird.



◀ Abb. 3.14-2: Positionen der in MEMENTO vorhandenen Oberflächen-Punkte und Tiefprofildaten (Kreise) von N₂O. Der grüne Stern zeigt den Standort der Boknis-Eck-Zeitserienstation und der rosa Stern zeigt den Transitbereich der M/V FINNMAID. (Quelle: GEOMAR)

Woher kommen die Ressourcen?

Die meisten ozeanischen und atmosphärischen Beobachtungen auf nationaler und europäischer Ebene werden durch institutionelle sowie im Laufe von Drittmittelprojekten erworbenen Mitteln finanziert. In Deutschland ist das UBA für die Umsetzung der Qualitätssicherungsmaßnahmen von atmosphärischen N₂O-Messungen zuständig. Eines der im Rahmen von GAW

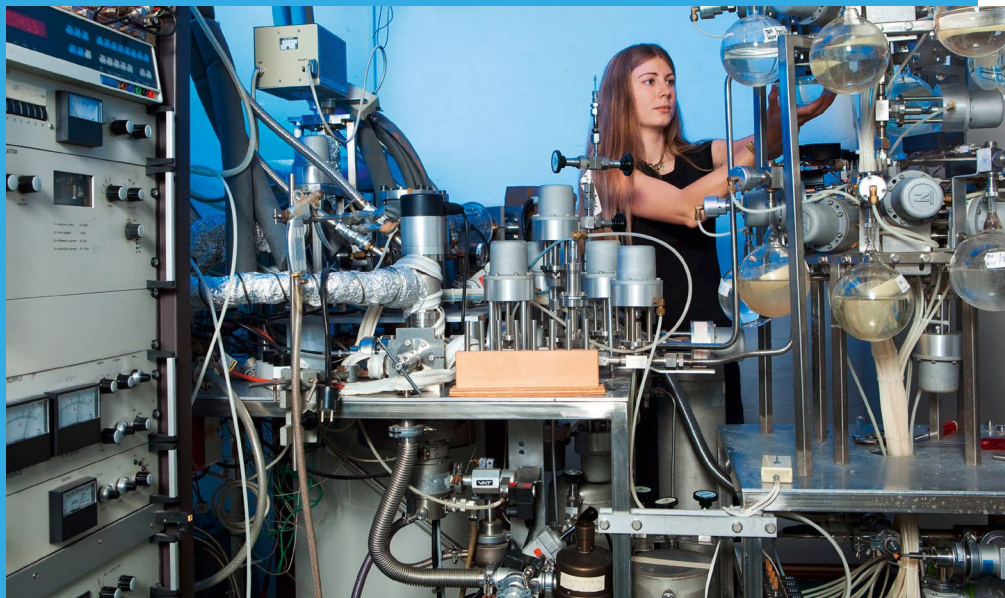
eingerrichteten Weltkalibrierzentren wird vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betrieben und durch das UBA finanziert. Außer den im Rahmen von ICOS-Deutschland durchgeführten N₂O-Messungen in der Ostsee (an Bord eines SOOP), gibt es in Deutschland keine kontinuierliche Finanzierung für Zeitserien von ozeanischen N₂O-Messungen.

gaw.kishou.go.jp public.wmo.int/en/programmes/global-atmosphere-watch-programme

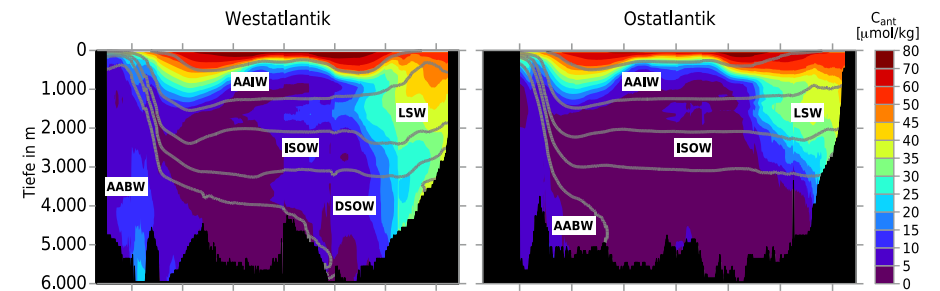
umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen icos-infrastruktur.de memento.geomar.de

3.15 Messung anthropogener Spurengase im Ozean

Anthropogene Spurengase wie Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) werden aus der Atmosphäre in den Ozean eingetragen. Zunächst dringen sie mittels Gasaustausch in das Oberflächenwasser ein. Durch vertikale Vermischung und Konvektion (Tiefenwasserbildung) gelangen sie von dort in größere Tiefen und breiten sich mit der großräumigen Zirkulation aus. Da die Spurengase weder chemisch noch biologisch reagieren, sind ihre Konzentrationen im Ozeaninneren nur abhängig von dem Jahr, an dem das Wasser die Oberfläche verlassen hat, und von der Vermischung.



Anthropogener Kohlenstoff im Atlantik



▲ Abb. 3.15-1: Verteilung von anthropogenem Kohlenstoff (C_{ant}) im Westatlantik (links) und Ostatlantik (rechts) für das Jahr 2010. Die wichtigsten Wassermassen sind ebenfalls dargestellt: Antarktisches Zwischenwasser (AAIW), Labradorseewasser (LSW), Island-Schottland-Überstromwasser (ISOW), Dänemarkstraßen-Überstromwasser (DSOW) und Antarktisches Bodenwasser (AABW). (Quelle: IUP)

Klimasignale

Über die Verfolgung von Anomalien in den Konzentrationen anthropogener Spurengase kann die Schnelligkeit abgeschätzt werden, mit der sich Klimasignale im Ozean ausbreiten. Klimamodelle sagen ein Abschwächen in den Bildungsraten und der damit verknüpften Umwälzbewegung voraus. Dies führt zu Änderungen im Transport von Wärme und Frischwasser, mit erheblichen Konsequenzen für Westeuropa bezüglich Klima und Meeresspiegel. Außerdem beeinflusst es die Speicherung von anthropogenem Kohlenstoff.

Die ozeanischen Schlüsselregionen reagieren sehr sensitiv auf Änderungen im atmosphärischen Antrieb. Diese hohe Sensitivität führt aber auch dazu, dass natürliche Schwankungen im atmosphärischen Antrieb eine hohe natürliche Variabilität im Ozean zur Folge haben. Dadurch wird die Identifizierung von anthropogen verursachten Schwankungen erschwert, und lange Beobachtungszeitreihen sind nötig, um Trends von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden.

Wo wird gemessen?

Die Spurengase (FCKW, SF₆) werden aus den Wasserproben extrahiert und dann gaschromatographisch gemessen. Dies kann entweder direkt auf dem Forschungsschiff geschehen, oder die Wasserproben werden in abgeschmolzenen Glasampullen in das Heimatlabor transportiert und dort analysiert. Pro Schiffsexpedition fallen etwa 1.000–3.000 Proben an. Ohne die Infrastruktur an deutschen Forschungsschiffen wie FS POLARSTERN, FS METEOR und FS M. S. MERIAN wäre eine Probennahme in diesem Umfang nicht möglich.

Der Schwerpunkt der deutschen Messungen liegt im Atlantik (siehe Abb. 3.15-2). Die Spurengasmessungen im atlantischen Sektor des Südlichen Ozeans (Weddellmeer und Zirkumpolarstrom) begannen 1986 und wurden seitdem in zwei- bis dreijährigen Abständen wiederholt. Dies konnte nur mithilfe des Forschungseisbrechers FS POLARSTERN geschehen. Die Messungen entlang 0° gehören zu den längsten Spurengaszeitreihen weltweit. Weitere Regionen mit deutschen Spurengasmessungen liegen im tropischen Atlantik und Pazifik (Auftriebsgebiete), im Mittelmeer, im subpolaren Nordatlantik (Tiefenwasserbildungsgebiet) und, seit einigen Jahren, auch verstärkt in der Arktis (u. a. Proben im Rahmen von MOSAiC). Für den Atlantik ist Deutschland im Bereich der Spurengasmessungen und ihrer Interpretation technisch und wissenschaftlich führend,

Deutschland führt auch die meisten Messungen durch.

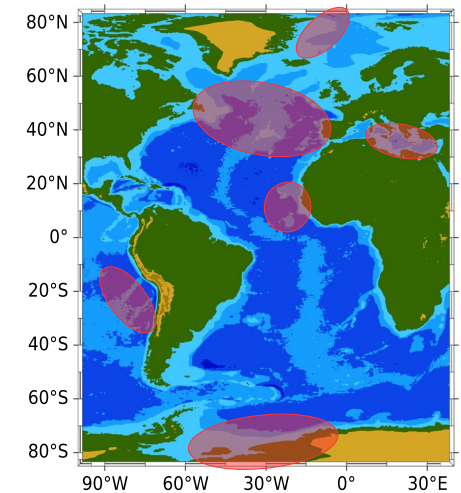
Da die Spurengasmessungen im Rahmen von drittmittelfinanzierten Forschungsprojekten durchgeführt werden, stehen verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen im Vordergrund. Dazu gehören die Änderungen in der Bildung und Ausbreitung von Tiefenwasser, Ventilation von Wassermassen und deren Variabilität, Auftrieb, Vermischung und vertikale Wärmeflüsse.

Eine weitere Anwendung von Spurengasmessungen betrifft die Speicherung von anthropogenem CO₂ (C_{ant}) im Ozean. Das Treibhausgas gelangt wie die anderen Spurengase über den Gasaustausch mit der Atmosphäre in den Ozean, ist aber in chemische und biologische Prozesse eingebunden. Diese lassen sich schwer einschätzen. Daher ist eine der international verwendeten Methoden die Berechnung der Menge von C_{ant} im Ozean aus den Spurengasverteilungen.

Infolge des Montreal-Protokolls zum Schutz der Ozonschicht nimmt die Konzentration von FCKW in der Atmosphäre seit ca. 20 Jahren leicht ab. Dadurch stagniert auch der FCKW-Gehalt in den ozeanischen Konvektionsgebieten, was eine Bestimmung der Ausbreitungszeit des Wassers erschwert oder sogar unmöglich macht. Deshalb wird in diesem Fall bevorzugt SF₆ als Spurenstoff verwendet, dessen atmosphärische Konzentration nach wie vor ansteigt.

Internationale Einbettung und Datenprodukte

Die nationalen Spurengasmessungen sind eingebunden in internationale Forschungsprogramme wie das »World Climate Research Programme (WCRP)«-Projekt CLIVAR, das sich mit Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit befasst, mit Schwerpunkt auf der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre. Weiterhin sind die Messungen eingebunden in europäische Forschungsprojekte wie CARBOOCEAN, CARBOCHANGE, AtlantOS und COMFORT. Die deutschen Spurengasdatensätze wurden und werden in die europäischen und internationalen Spurenstoffarchive sowie in die nationale Datenbank PANGAEA® eingebunden. Ebenso sind sie Bestandteil vom Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP, glodap.info). Im Rahmen dieses Projektes werden weltweit die Daten aus Spurengasmessungen und anderer kohlenstoffrelevanter Parameter gesammelt, qualitätskontrolliert und in einem einheitlichen Format veröffentlicht. Dies ermöglicht z. B. den einfachen Zugriff auf Daten, um ein becken- oder weltweites Inventar für C_{ant} im Ozean zu erstellen.



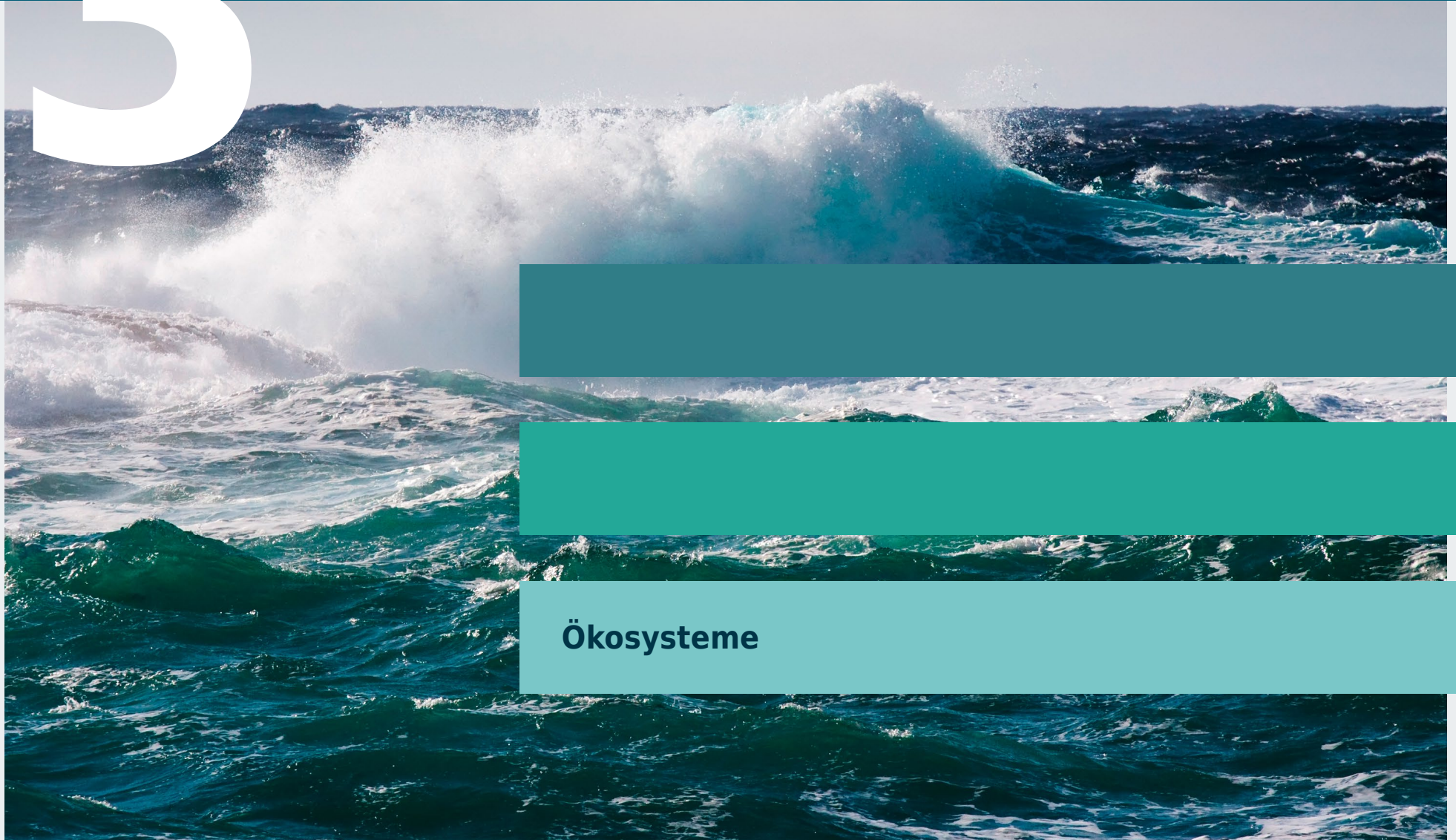
▲ Abb. 3.15-2: Gebiete mit regelmäßigen Spurengasmessungen deutscher Institute (GEOMAR und Universität Bremen) in Rot markiert (Quelle: IUP)

Woher kommen die Ressourcen?

Die Spurengasmessungen – einschließlich Teile des technischen Personals und der technischen Weiterentwicklung der Analysesysteme – werden über befristete Forschungsprojekte finanziert und sind damit nicht kontinuierlich gesichert. Außerdem können die Messungen nur durchgeführt werden, wenn Schiffszeit auf geeigneten Forschungsschiffen (FS M. S. MERIAN, FS METEOR, FS POLARSTERN) bewilligt wird.

3

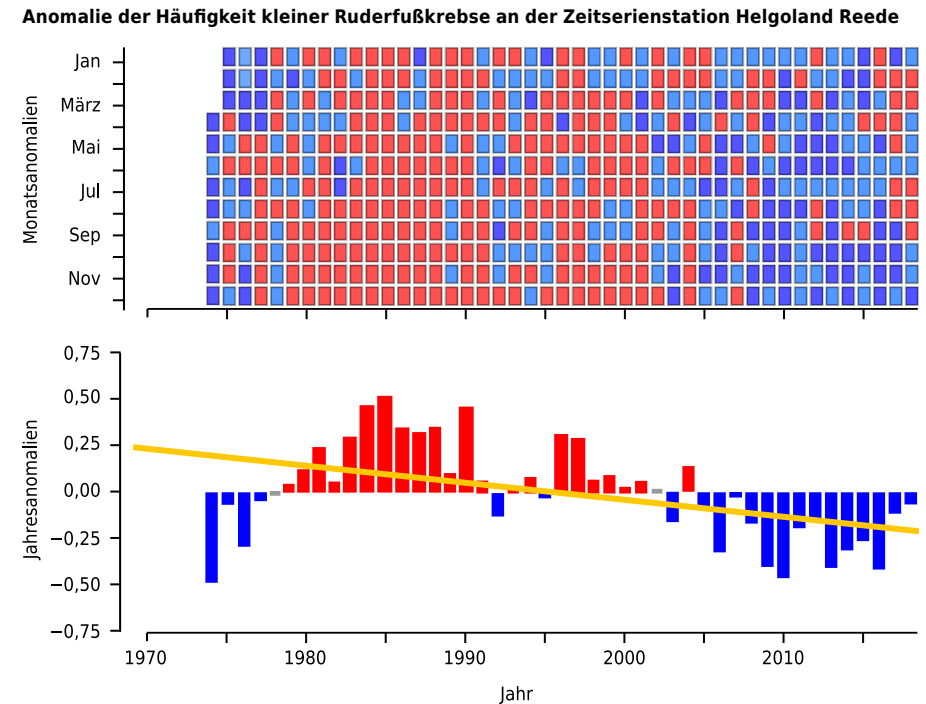
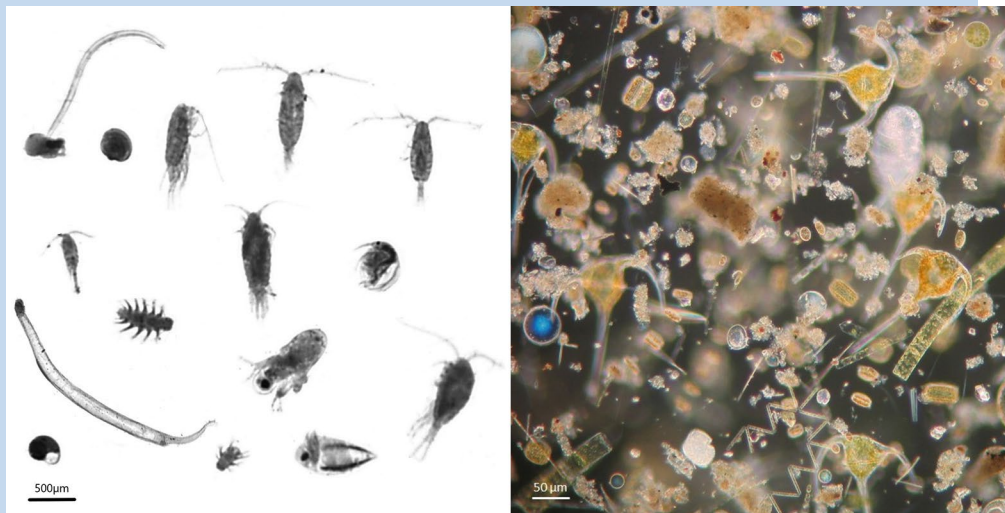
Ozeanische Beobachtungen



Ökosysteme

3.16 Plankton

Als Plankton werden im Freiwasser treibende Organismen bezeichnet, die nicht selbstständig gegen Meeresströmungen schwimmen können. Man unterscheidet Phytoplankton, welches einzellige Bakterien und Mikroalgen umfasst und mittels Photosynthese die Basis für das marine Nahrungsnetz darstellt, und Zooplankton, welches eine Vielzahl von Tieren umfasst - von einzelligen Ciliaten und Ruderfußkrebsen bis hin zu sehr großen Quallen. Das Zooplankton ist das wichtigste Bindeglied von der Primärproduktion zu höheren trophischen Ebenen wie z. B. Fischen und somit von hoher Bedeutung für marine und ozeanische Ökosysteme. Phyto- und Zooplankton dienen als Indikatoren für den Gewässerzustand und sind deshalb auch Parameter der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie.



▲ Abb. 3.16-1: Saisonale und interannuale Anomalie der Abundanz kleiner Copepoden an der Zeitserienstation Helgoland Reede (Quelle: GEOMAR nach NMFS)

Klimasignale

Quantitative Beobachtungen des Planktons anhand von standardisierten Netzfängen gibt es seit Ende des 19. Jahrhunderts. Vergleichbar lange Messreihen wie für atmosphärische und hydrographische Parameter existieren für Plankton noch nicht. Die verfügbaren Daten des letzten Jahrhunderts zeigen, dass sich insbesondere in den gemäßigten Breiten Ver-

schiebungen der Verbreitung ergeben haben, sodass in der Nord- und Ostsee vermehrt Arten auftreten, die durch höhere Temperaturen begünstigt werden, und andere entsprechend in die Polarregionen zurückgedrängt werden. Auch ergibt sich analog zu Änderungen der Vegetationsperiode an Land eine Verschiebung der Phänologie, d. h. der zeitlichen Abfolge der Wachs-

◀ Foto 3.16-1: Zooscan-Aufnahmen von verschiedenen Mesozooplanktonorganismen aus der Ostsee (links) und mikroskopische Aufnahme (Dunkelfeld) einer lebenden Planktonprobe aus der Ostsee, die hauptsächlich Kieselalgen und Dinoflagellaten enthält (rechts). Die Vergrößerung unterscheidet sich um ca. Faktor 10 (siehe Maßstab).

Wo wird gemessen?

Die längste andauernde Messreihe in Deutschland ist die Zeitserie Helgoland Reede (54° 11' 18" N, 7° 54' E). Sie beginnt 1962 (Phytoplankton, an jedem Werktag) bzw. 1975 (Zooplankton, an jedem Montag, Mittwoch und Freitag). Zusätzlich zur Helgoland Reede werden auch drei Transekte von Helgoland aus in die Mündungstrichter von Weser, Elbe und Eider einmal im Monat beprobt. Diese Langzeitreihe wird als Helgoland Schnitffahrten bezeichnet und auch schon seit über 30 Jahren betrieben. Wie an der Helgoland Reede werden auch hier Temperatur, Salzgehalt und anorganische Nährstoffe gemessen. Auch die Phytoplanktondiversität wird seit einigen Jahren erhoben. Die 1979 im Rahmen der Helsinki-Kommission (HELCOM) eingerichtete Ostsee-Zeitreihe des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) erfasst langfristige Veränderungen der Planktonabundanz und -diversität in Abhängigkeit von klimatischen und anthropogenen Einflüssen, die während fünf Ausfahrten pro Jahr im Februar, März, Mai, August und November an 10 (Phytoplankton) bzw. 9 (Zooplankton)

Stationen beprobt werden. Die überwachten Standorte erstrecken sich von der Westlichen Beltsee und der Arkonasee bis zum Bornholm- und dem Östlichen Gotlandbecken entlang eines ausgeprägten Salzgehalts- und Tiefengradienten, der einen starken Einfluss auf das lokale Plankton ausübt. Koordiniert durch die BLANO-Facharbeitsgruppe Eutrophierung, Nährstoffe und Plankton (Fach-AG EuNäP) arbeiten die in den jeweiligen Ländern zuständigen Behörden (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR), Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) und Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)) an einem zunehmend harmonisierten Messprogramm in Nord- und Ostsee. Weiterhin

werden in den letzten Jahren vermehrt Echtzeitmessungen durchgeführt, die von Forschungsschiffen weitgehend unabhängig sind und kontinuierliche Beobachtungen ermöglichen. Hervorzuheben sind hierbei die drei Unterwasserknoten des Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas (COSYNA) in der Nordsee (Helgoland), Ostsee (Boknis Eck) und im Arktischen Ozean auf 79° N vor Spitzbergen. Hier werden neben hydrographischen Parametern auch akustische und optische Plankton-Daten erhoben. Die Zeitserie des Cape Verde Ocean Observatory (CVOO) enthält neben den kontinuierlichen Messungen der ozeanographischen Verankerung ebenfalls schiffsbasierte Punktbeobachtungen des Zooplanktons bis in 1.000 m Tiefe. Langfristig soll dies monatlich erfolgen.

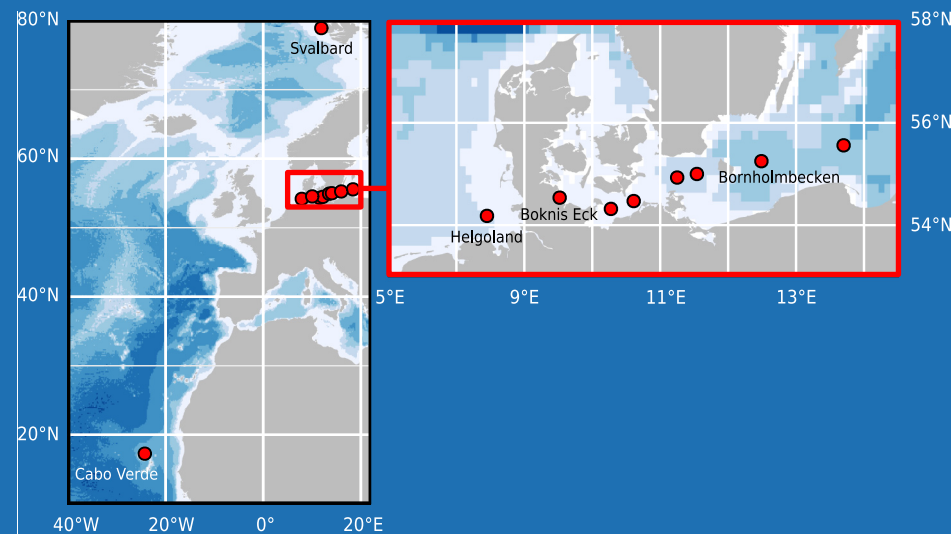


Abb. 3.16-2: Karte der durch deutsche Wissenschaftler betreuten Plankton-Zeitserienstationen (Quelle: GEOMAR) ▶

tumsperioden von Primärproduzenten (Phytoplankton) und darauf aufbauenden Konsumenten (Zooplankton). Da das Vorhandensein von geeignetem Zooplankton im Frühjahr insbesondere für die Fischbrut von Bedeutung ist (Match/Mismatch), ergibt sich hier ein direkter Zusammenhang zu kommerziell genutzten Fischbeständen.

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Die Arbeitsgruppen WGPME (Working Group on Phytoplankton and Microbial Ecology) und WGZE (Working Group on Zooplankton Ecology) des internationalen Rats für Meeresforschung (ICES) sind internationale Expertengruppen, die Methoden und Analysen der Zeitserien beraten und koordinieren. Diese ICES-Arbeitsgruppen haben auch mit der SCOR (Scientific Committee on Oceanic Research) WG125 die integrierte Datenbank COPEPOD (kurz für Coastal & Oceanic Plankton Ecology, Production, & Observation Database) begründet. Die HELCOM PEG (Phytoplankton Expert Group) koordiniert das Monitoring in der Ostsee, welches anteilig durch die jeweiligen Anrainerstaaten durchgeführt wird. ILTER (International Long Term Ecological Research) ist ein internationales Netzwerk zu ökologischen Langzeitbeobachtungen, welches sowohl terrestrische als auch limnische und marine Systeme umfasst. Die von den Landesbehörden erhobenen Daten werden an die nationale Meeresumweltdatenbank MUDAB geliefert.



Viele Daten (sowohl an Zeitserienstationen als auch individuelle Probenahmen) werden in der COPEPOD-Datenbank der NOAA zusammengeführt, die einen Zugriff erlaubt z. B. auf Abundanz- und Biomassedaten taxonomischer Großgruppen (wie etwa Kieselalgen oder Ruderfußkrebse). Die detaillierteren Beobachtungen auf Gattungs- oder Artniveau werden in der Regel durch die einzelnen Institutionen z. B. auf PANGAEA® veröffentlicht und sind dann frei verfügbar. Die COSYNA-Daten sind in einem eigenen Datenportal öffentlich abrufbar.

Woher kommen die Ressourcen?

Die meisten bestehenden Zeitserienproben werden nach wie vor manuell unter dem Mikroskop ausgezählt und die Ressourcen hierfür werden aus den Haushalten der durchführenden Forschungsinstitute, den Landeshaushalten oder aus eingeworbenen Drittmittelprojekten bereitgestellt. Im Gegensatz zu Parametern, die durch kalibrierte Sensoren direkt gemessen werden können, besteht der Hauptressourcenbedarf im Bereich Planktonmonitoring in dem Zeitaufwand durch gut ausgebildetes Personal zur taxonomischen Auswertung. Die Nutzung von Bildanalyse (sowohl In-situ-Beobachtungen als auch Digitalisierung von Proben) bietet eine zunehmend attraktive Alternative, da die Sortierarbeit durch Machine Learning erleichtert und konsistenter wird (muss aber nach wie vor durch Experten validiert werden). Zudem bietet sich die Möglichkeit eines digitalen Archivs, sodass Personeneffekte über die Zeit minimiert werden können.

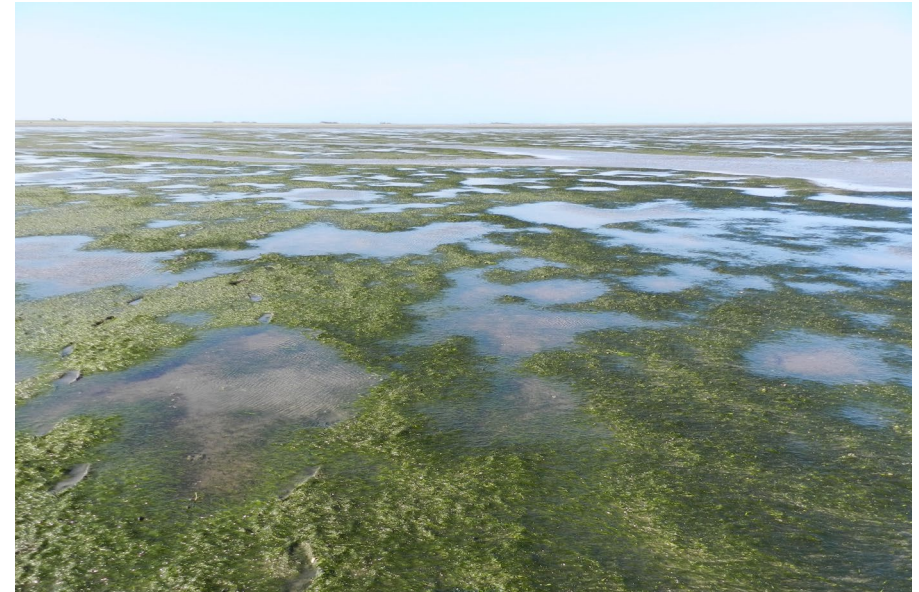
◀ Foto 3.16-2: Quantitative Planktonnetzfänge bleiben ein integraler Bestandteil von Plankton-Langzeitbeobachtungen. Die Planktonnetze werden je nach Zielgruppe mit unterschiedlichen Durchmessern und Maschenweiten eingesetzt. Hier ist ein sogenanntes Bongonet (kombiniert mit Baby-Bongo oben) zu sehen.

ufz.de/iter-d <https://codm.hzg.de/codm/> geoportal.bafg.de/MUDABAnwendung

mhb.meeresschutz.info/de/kennblaetter/neue-kennblaetter/details/pid/7

3.17 Marine Habitate

Deutschland ist reich an marinen Habitaten. Diese beinhalten Seegraswiesen, die sowohl in der Nordsee (nahe der Insel Sylt) als auch der Ostsee auftreten, und Weichsubstrate (Sand und Schlamm). Hartsubstrate (Felswattgebiete) sind, mit Ausnahme künstlicher Substrate, hauptsächlich um die Nordseeinsel Helgoland herum zu finden. Die Hauptmotivation für das Monitoring dieser Habitate in Deutschland dient, abgesehen vom reinen wissenschaftlichen Interesse, der Erfüllung nationaler und internationaler Berichtspflichten. Das Monitoring der Weichsubstrate findet in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) basierend auf den Vorgaben europäischer Richtlinien wie der Habitat-Direktive und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie statt und dient ferner der Bewertung von Management-Maßnahmen zur Begrenzung von Fischereiaktivitäten.



▲ Foto 3.17-2: Seegräser treten in Gemeinschaft auf und können große Wiesen ausbilden, so wie hier im Nordfriesischen Wattenmeer bei der Insel Föhr.

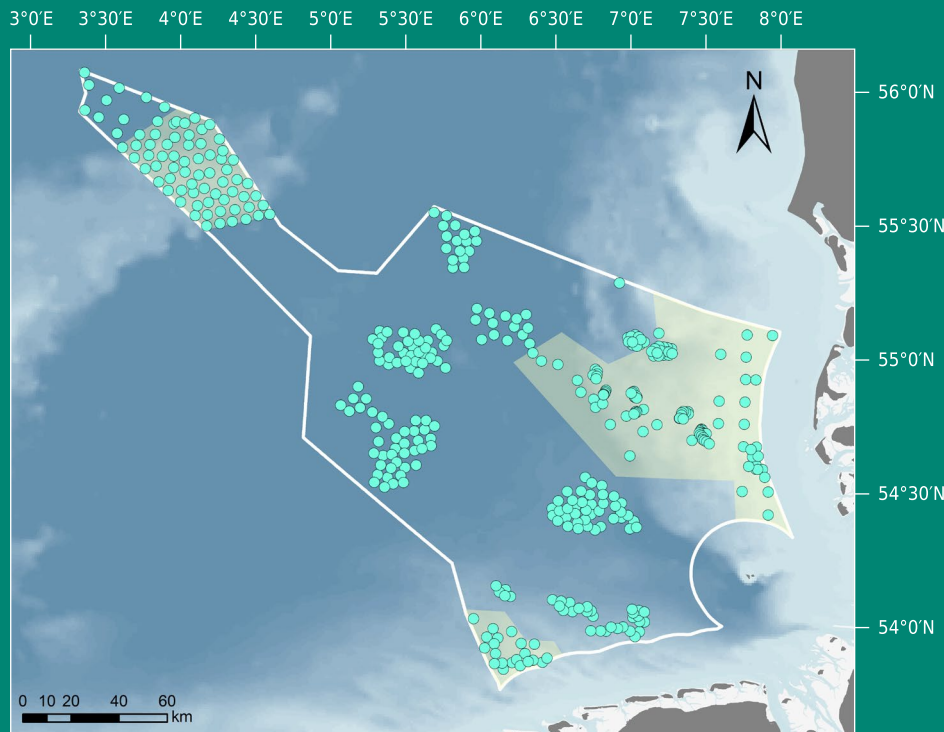
Klimasignale

Für die hier beschriebenen Weichsubstrate haben die Monitoringaktivitäten bisher noch keine klaren Klimasignale ergeben.

Das Monitoring der Makroalgen und Makrobenthosgemeinschaften hat hingegen bereits festgestellt, dass in den letzten Jahren zunehmend invasive Arten in die Gebiete um Helgoland eingewandert sind und dass Arten, die bisher nur aus umliegenden Küstengebieten bekannt waren, sich nun auch

um Helgoland angesiedelt haben. Bei diesen Arten scheint es sich vorwiegend um warm-gemäßigte Arten zu handeln. Gleichzeitig hat die Bedeckung mit Braunalgen im mittleren und unteren Gezeitenbereich zugenommen, vermutlich bedingt durch mildere Winter und Frühlinge. Es werden jedoch weitere langfristige Untersuchungen notwendig sein, bevor diese Schlussfolgerung bestätigt oder widerlegt werden kann.

◀ Foto 3.17-1: Seegraswiese bei Dranske/Ostsee



◀ *Abb. 3.17-1: Überblick über die Stationen, die seit 2011 kontinuierlich beprobt werden. Diese Beprobungen finden im Rahmen des Projekts »Label« in der deutschen AWZ in der Nordsee statt. Sie werden finanziert durch das BfN. (Quelle: Beermann/AWI)*

Wo wird gemessen?

Weichsubstrate (Sand und Schlamm):

Macrobenenthos monitoring wird in der deutschen AWZ in der Nordsee regelmäßig seit 2011 durchgeführt. Zusätzlich werden Weichsubstrate, Fischdiversität und -bestände auch am Thünen-Institut (Nordsee und Keltische See) sowie am Forschungsinstitut Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven für verschiedene Stationen in der deutschen Bucht und der Doggerbank überwacht.

Hartsubstrate (Felswattgebiete):

1. Seit 2004 wird zweimal pro Jahr vor der Insel Helgoland ein Monitoring der Makroalgenflora und des mit dieser assoziierten Makrozoobenthos (Muscheln und Schnecken) durchgeführt. Ein festes georeferenziertes Messnetz mit ungefähr 100 Messpunkten wurde im Gezeitenbereich etabliert. An jedem Punkt wird die relative Bedeckung aller sichtbaren Arten quantitativ

erfasst. Zusätzlich wird einmal jährlich die Gesamtdiversität der Makroalgen des Gezeitenbereichs anhand klassischer morphologischer Merkmale bewertet sowie die räumliche Ausdehnung der Braunalge *Fucus serratus* vermessen.

2. Für das Sublitoral wird die Tiefenverbreitung charakteristischer Arten wie der basierend auf ihrer Biomasse dominierenden Braunalge *Laminaria hyperborea* (Palmentang) untersucht. Diese Untersuchung wurde seit 2008 mindestens dreimalig in 6 Jahren durchgeführt. Dabei wurden die Daten quantitativ entlang dreier paralleler Transekte in unterschiedlichen Tiefen erfasst.
3. Zusätzlich zum Monitoring der Makroalgen wird das Zoobenthos jährlich durch das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) erfasst. Hierfür werden mehrere Proben aus dem Bereich der Tiefen Rinne südlich von Helgoland und von auf Haftkrallen der *L. hyperborea* lebendem Zoobenthos untersucht.

Internationale Einbettung und Datenzugriff

Das Monitoring der benthischen Gemeinschaften der Weichsubstrate ist in die Aktivitäten des International Council for the Exploration of the Sea (ICES) sowie der Expertengruppen der OSPAR Commission eingebettet. Offen zugängliche Datenrepositorien sind die des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), ICES, OSPAR und CRITTERBASE des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI). Rohdaten werden beim Geldgeber LLUR eingereicht und dort mit standardisierten Metadaten in die Biodatenbank des LLUR eingepflegt. Das Alfred-Wegener-Institut hat Zugang zu dieser Datenbank.

Woher kommen die Ressourcen?

Die Monitoringaktivitäten für die Weichsubstrate in der deutschen AWZ (für den durch das AWI betreuten Anteil) werden durch das BfN-Projekt »Label« gefördert sowie durch AWI-Grundfinanzierung. Das Monitoring der Felswattbereiche wird hauptsächlich durch das LLUR finanziert.

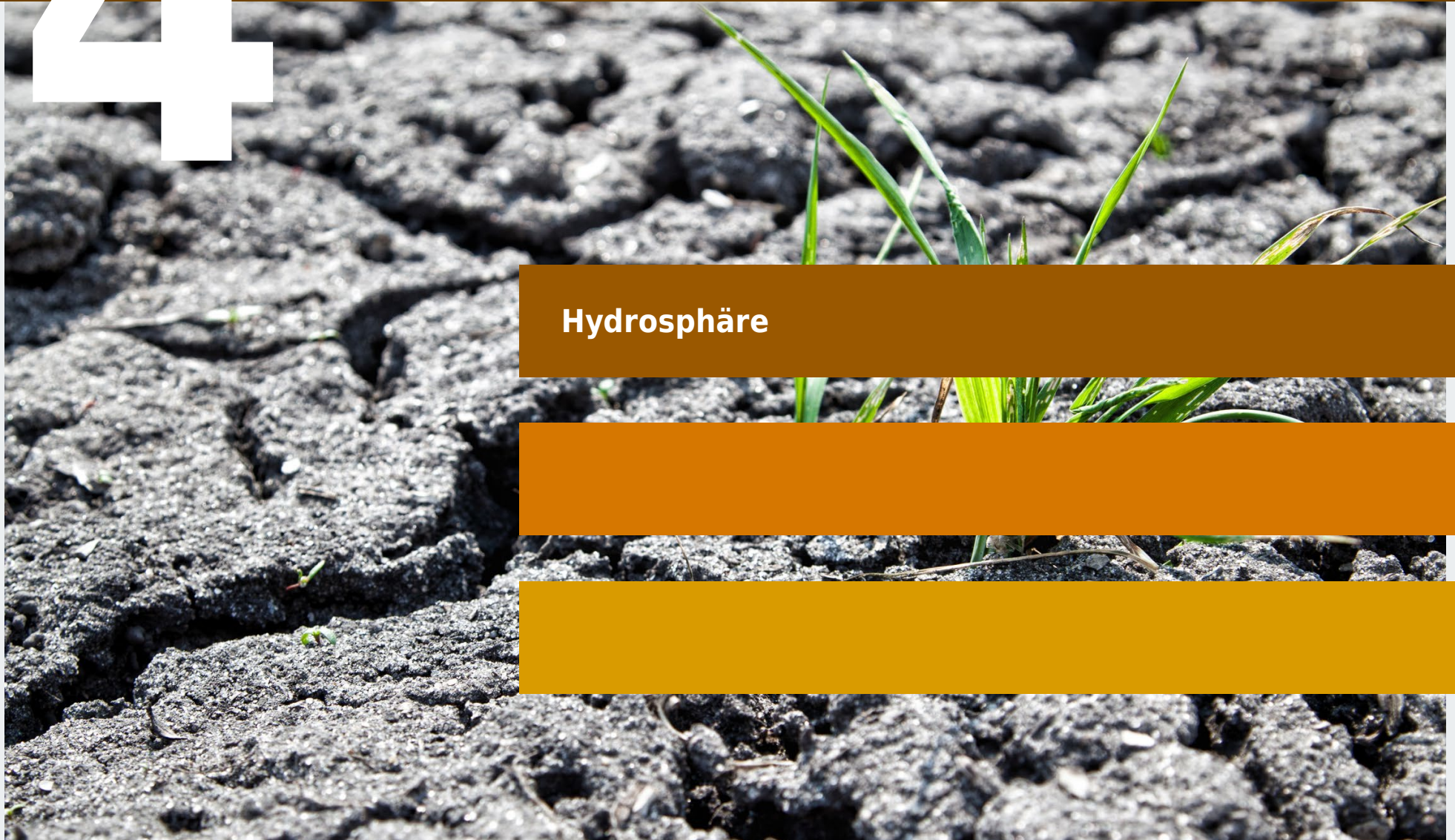
4

Terrestrische Beobachtungen



4

Terrestrische Beobachtungen



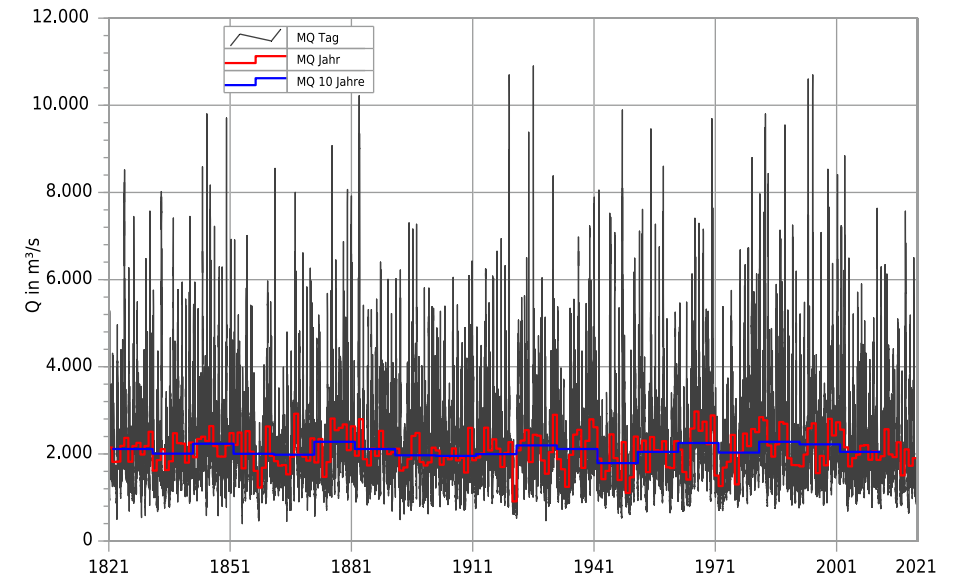
Hydrosphäre

4.1 Abfluss

Für zahlreiche sozioökonomische und ökologische Belange, nicht erst im Rahmen von Klimauntersuchungen bzw. der Klimafolgenforschung, werden von alters her möglichst umfangreiche Daten über das Wasserdargebot benötigt. Dabei beruht die Qualität aller zu gewinnenden Aussagen entscheidend auf der Qualität des Datenmaterials: Ergebnisse können nicht besser sein als die verwendeten Daten.



Verlauf der mittleren Abflüsse am Rhein-Pegel Köln seit 1821



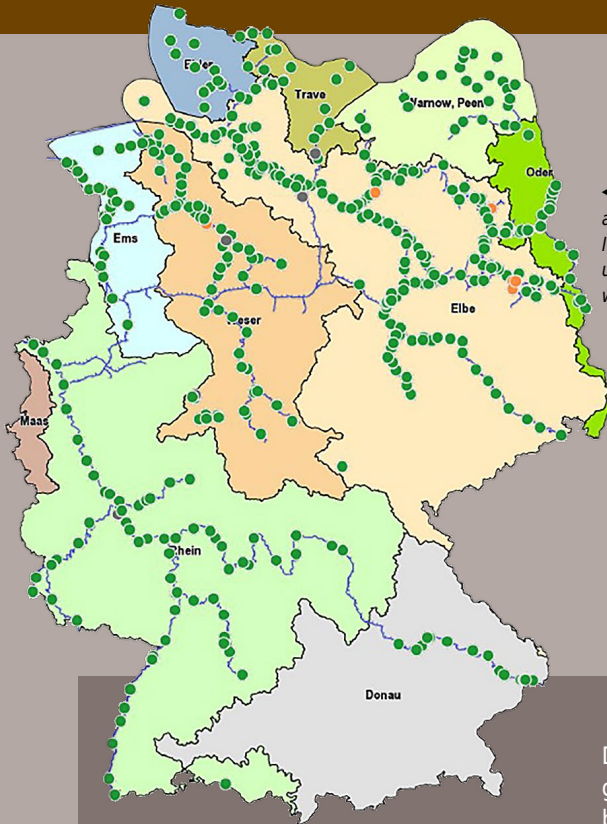
▲ Abb. 4.1-1: Tages-, Jahres- und dekadische Mittel des Abflusses (Q in m^3/s) seit 1821, Ausschnitt aus der seit 1816 bestehenden langen Reihe am Pegel Köln/Rhein, MQ = mittlerer Abfluss (Quelle: BfG nach BfG und WSV)

◀ Foto 4.1-1: Pegellatte und historische Hochwassermarken am Pegel Andernach/Rhein

Klimasignale

Schon in alten Hochkulturen sind Pegel eingerichtet und die dort gewonnenen Beobachtungen dokumentiert worden. Dies war oft Voraussetzung für die Existenz der Gemeinschaften, für die die Notwendigkeit bestand, sich im Hinblick auf den effizienten Umgang mit der Lebensgrundlage Wasser zu organisieren. So existiert bereits aus dem dritten Jahrtausend v. Chr. eine rund 500 Jahre umfassende kontinuierliche Aufzeichnung der jährlichen Hochwasserstände des Nils. In Deutschland sind Pegelrichtungen seit dem 18. Jahr-

hundert belegt. Die ältesten langen Reihen hier sind die Wasserstandszeichnungen von Magdeburg/Elbe (seit 1727) und von Düsseldorf/Rhein (seit 1766). Die in Abb. 4.1-1 dargestellten Abflüsse am Rhein-Pegel Köln weisen außer periodischen Schwankungen keinen systematischen Langzeittrend auf. Dies gilt allerdings nicht in gleicher Weise für die anderen Fließgewässer in Deutschland. Insbesondere die Wasserführung von Flüssen in anthropogen stark geprägten Einzugsgebieten zeigt oft trendhafte Veränderungen.



◀ Abb. 4.1-2: Pegelkarte von Deutschland: aktuelle Wasserstände wichtiger hydrologischer Messstellen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung an Bundeswasserstraßen (Quelle: WSV)

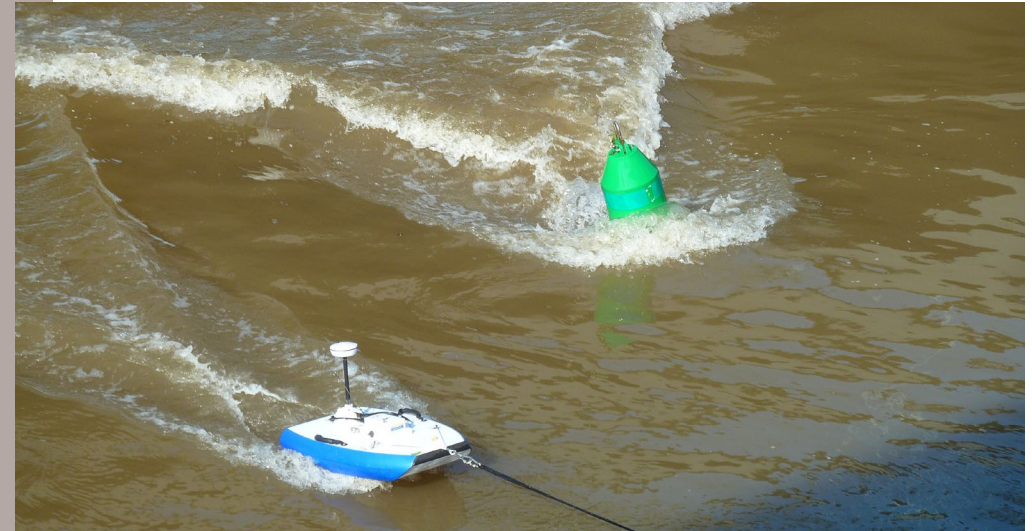


Foto 4.1-2: Abflussmessung beim Elbehochwasser 2013 mit einer »Acoustic Doppler Profiler«-Messeinheit im Vordergrund ▶

Messungen in Deutschland

Auch in der heutigen technisierten Gesellschaft sind lange Abflussdatenreihen von essentieller Bedeutung. Mit ihrer Hilfe wird das Abflussgeschehen in seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität analysiert, werden das nutzbare Wasserdargebot sowie Hoch- und Niedrigwasserrisiken bestimmt, Auswirkungen anthropogener Beeinflussungen (Klimaänderung, Landnutzungsänderung) untersucht und wasserwirtschaftliche Strategien, Konzepte und Entscheidungen entwickelt und begründet.

Das hydrologische Messnetz in Deutschland ist aufgeteilt auf das übergreifende Pegelnetz des Bundes, betrieben durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), sowie auf 16 Bundesländer, auf kommunale Gebietskörperschaften und auf Dritte (z. B. Trinkwasserversorger). Es umfasst rund 4.250 gewässerkundliche Pegel, davon ca. 3.000 Pegel mit Durchflussermittlung. Beobachtet und dokumentiert wird dabei das gesamte Binnengewässersystem (bis hinunter zu Gräben) mit einer Gesamtlänge von rund 500.000 km. Die großen, schiffbaren Fließgewässer in den Stromgebieten von Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser und Ems werden durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betreut. Hier betreibt die WSV neben zahlreichen Betriebspegeln

auch rund 620 gewässerkundliche Pegel, davon 163 Pegel mit Ab- bzw. Durchflussermittlung.

Allein im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ) werden internetgestützt (siehe Link am Ende) die Daten von rund 1.170 Pegeln als Tageswerte und Monatsmaxima mit zugehörigen vieljährigen Hauptwerten, Dauerzahlen und Extremwerten veröffentlicht. Daneben sind in der Druckversion des DGJ historische Daten von einer großen Anzahl weiterer Stationen (auch Tide-, Wassertemperatur- und Schwebstoffdatenreihen) berücksichtigt. Die durchschnittliche Länge der Abflussreihen im DGJ beträgt 55 Jahre. Allerdings ist hier standardmäßig die berücksichtigte Reihenlänge maximal auf den Zeitraum bis zurück ins Jahr 1931 beschränkt,

auch wenn grundsätzlich noch ältere Daten bei den Pegelbetreibern vorliegen können: In nahezu allen Stromgebieten bestehen z. B. Pegel mit mehr als 100-jähriger Beobachtungsdauer, die meisten WSV-Pegel davon im Rhein- (20 Stationen), Donau- (8), Weser- (10), Oder- (2) und im Elbegebiet (20). Über das DGJ hinaus sind wichtige Archivierungs- bzw. Distributionszentren für die Daten von Pegeln an Bundeswasserstraßen die Datenbanken der Regionalbehörden der WSV sowie (übergreifend) der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Die Bundesländer unterhalten zudem eigene Datenbanken für die von ihnen betriebenen Stationen. Einen Überblick bietet das internetgestützte länderübergreifende Pegelportal (siehe Link am Ende).



Gesetzliche Grundlagen

Als föderaler Staat und Mitglied in der Europäischen Union (EU) hat die Bundesrepublik Deutschland in der wasserbezogenen Gesetzgebung EU-Recht (Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL)) umzusetzen sowie Bundes- und Länderbelange differenzierend zu ordnen. Dies geschieht über das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) des Bundes, welches für viele Länderregelungen Öffnungsklauseln enthält. Die verkehrlich genutzten Bundeswasserstraßen mitsamt ihrem Wasserstands- und Hochwassermeldedienst unterliegen überdies dem Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG). Die Verfügbarkeit erhobener Messdaten regelt das Umweltinformationsgesetz (UIG).

Internationale Einbettung

Das in Deutschland angesiedelte Globale Abflussdatenzentrum (GRDC, siehe Beitrag 5.2) erhält von Bund und Ländern Abflussdaten von mehr als 336 Stationen, mit denen die GRDC-Datenbank betrieben wird. Diese beinhaltet jetzt auch Stationen des ehemaligen Europäischen Wasserarchivs der Forschungsgruppe UNESCO EURO-FRIEND-Water. Der Beitrag zum Global Terrestrial Network for River Discharge (GTN-R), welches durch GCOS, GTOS und das WMO-Programm Hydrology and Water Resources getragen wird, erfolgt durch das GRDC. Ausgewählte Echtzeitdaten zu Wasserstand und Abfluss unterstützen die mittel- bis langfristige Hochwasserfrühwarnung des European Flood Awareness System (EFAS) des EU Joint Research Centre in Ispra, Italien.

Ressourcenbedarf

Die Anforderungen an die gewässerkundliche Statistik werden größer, da die politisch-gesellschaftlichen Ansprüche an die Berechnung hydrologischer Kenngrößen hinsichtlich ihrer Aussagekraft und ihrer politischen Relevanz immer bedeutender werden. Hierzu ist es zwingend notwendig, einerseits über adäquate Datengrundlagen zu verfügen, andererseits moderne Methoden der hydrologischen Modellierung und Statistik zu entwickeln und anzuwenden. Dabei ist stets eine angemessene Ressourcenbereitstellung zu gewährleisten.

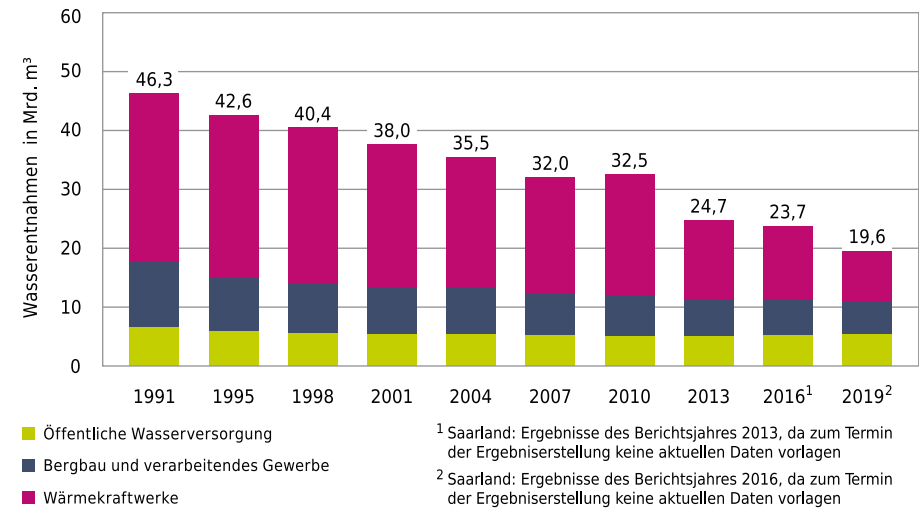
◀ Foto 4.1-3: Radarpegel Borkum-Südstrand mit vier Sensoren

4.2 Wassernutzung

In Deutschland werden der demografische und technologische Wandel sowie klimatische Veränderungen den Wasserbedarf und das Wasserdargebot stark beeinflussen, sodass Kenntnisse über die Entwicklung der Wassernachfrage der wichtigsten Nutzergruppen Industrie, private Haushalte und Landwirtschaft von großer Bedeutung sind.



Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, der Industrie und der Wärmekraftwerke



▲ Abb. 4.2-1: Zeitreihe der Wasserentnahme in Milliarden Kubikmetern durch die öffentliche Wasserversorgung (grün), Bergbau und verarbeitendes Gewerbe (dunkelblau) und Wärmekraftwerke (magenta) (Quelle: Destatis)

Trends

In den letzten 30 Jahren sind die Entnahmemengen der Wärmekraftwerke, des Bergbaus und des verarbeitenden Gewerbes sowie der öffentlichen Wasserversorgung um fast 60 % zurückgegangen. Gründe hierfür sind technologische Weiterentwicklungen, Mehrnutzungs- und Kreislaufsysteme sowie politische Richtungsentscheidungen (»Energiewende«).

Die öffentliche Wasserversorgung stellt für etwa 99 % der privaten Haushalte und Kleingewerbe Trinkwasser bereit, welches zum größten Teil aus dem Grundwasser entnommen wird. Der tägliche Bedarf im privaten Bereich an Trinkwasser lag 2019 bei 128 Litern pro Einwohner und Tag und verringerte

sich damit zwischen 1990 und 2019 um 19 Liter pro Person. Dabei verlief die Entwicklung nicht kontinuierlich. Nach einem Rückgang bis 2007 auf 122 Liter und einer Stagnation bis 2013 steigt der Wasserbedarf seitdem wieder an. Die Entwicklung ist zunächst vor allem auf ein verändertes Verbraucherverhalten hin zum Wassersparen und auf die weitere Verbreitung wassersparender Haushaltstechnologie zurückzuführen. Die zwischenzeitliche Stagnation des Pro-Kopf-Bedarfs zeigt den zurückgehenden Einfluss dieses langjährigen Trends. Im Vergleich der Bundesländer zeigt sich für 2019 pro Einwohner und Tag eine Spannweite von 139 Litern in Hamburg und 93 Litern in Thüringen.

Messungen in Deutschland

Die Daten zu den Wasserentnahmen der kommunalen Unternehmen für die Versorgung der privaten Haushalte und des Kleingewerbes sowie aller Branchen der verarbeitenden und produzierenden Industrie, der Energieerzeuger und der landwirtschaftlichen Betriebe werden auf der Ebene der Bundesländer durch die statistischen Landesämter erhoben und auf der Bundesebene im Statistischen Bundesamt ausgewertet. In Deutschland werden der demografische und technologische Wandel sowie klimatische Veränderungen und energiepolitische Entscheidungen den Wasserbedarf und das Wasserdargebot stark beeinflussen, so dass Kenntnisse über die Entwicklung der Wassernachfrage der wichtigsten Nutzergruppen Industrie, private Haushalte und Landwirtschaft von großer Bedeutung sind. Die Trockenperioden der letzten Jahre mit temporärer, regionaler Wasserknappheit haben zu einer öffentlichen Diskussion über die Priorisierung von Nutzergruppen geführt. Für eine nachhaltige Sicherung der Wasserressourcen legte die Bundesregierung im Jahr 2021 eine nationale Wasserstrategie vor.

Die Erhebungen werden im Abstand von drei Jahren durchgeführt. Aktuelle Grundlage der Erhebungen ist das Umweltstatistikgesetz vom 22. September 2021. Die Auswertung der Daten erfolgt auf verschiedenen räumlichen, admini-

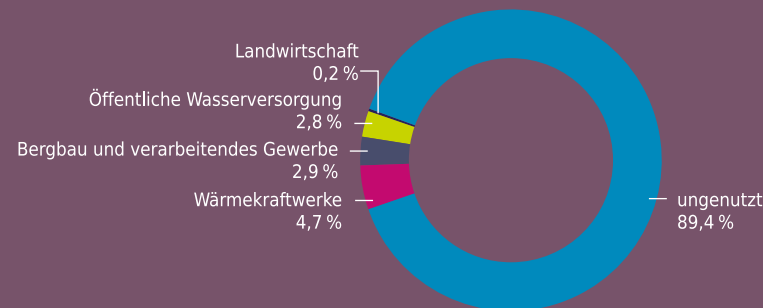
strativen und nicht administrativen Gebietseinheiten. Die Daten dienen zur Information der Öffentlichkeit und als politische Entscheidungshilfe für Maßnahmen des Gewässerschutzes. Hauptnutzer hierbei sind nationale und internationale Behörden, Institutionen, Verbände und sonstige private Interessenten.

Die Nutzergruppen Industrie einschließlich der Energiegewinnung, private Haushalte und Landwirtschaft entnehmen Wasser zu unterschiedlichen Anteilen aus dem Grund- und Oberflächenwasser. Industrie und Landwirtschaft decken ihren Bedarf häufig über eigene Gewinnungsanlagen, private Haushalte werden über kommunale Unternehmen versorgt.

Die größten Wassernutzer sind weiterhin die Wärmekraftwerke, die das Wasser zu Kühlzwecken entnehmen und nach der Nutzung fast vollständig wieder in den Wasserkreislauf zurückführen. Als zweitstärkster Wassernutzer gelten inzwischen die privaten Haushalte, gefolgt vom verarbeitenden Gewerbe und dem Bergbau.

Das Gesamtvolumen der Wasserentnahmen im Jahr 2019 von 20,7 Mrd. m³ entspricht damit etwa 11 % des potenziellen Wasserdargebots von 188 Mrd. m³ (Bezugsperiode 1961 – 1990). Das bedeutet, dass fast 90 % des langfristig gemittelten Wasserdargebots gegenwärtig ungenutzt bleiben. Regional betrachtet und auf einzelne Jahre bezogen kann die Situation zum Teil stark abweichen.

Wasserdargebot und Wassernutzung in Deutschland 2019



▲ Abb. 4.2-2: Potenzielles Wasserdargebot 188 Mrd. m³ = 100 % (Bezugsperiode 1961–1990). Für das Saarland sind die Ergebnisse des Berichtsjahres 2016 zugrunde gelegt, da zum Termin der Ergebniserstellung keine Daten für 2019 vorlagen. (Quelle: Destatis 2022, UBA 2017)

Gesetzliche Grundlagen

Bundesrechtliches Leitgesetz ist das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom Juli 2009 (zuletzt geändert im Juli 2022), welches die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union umsetzt und zusammen mit den untergesetzlichen Richtlinien den Schutz und die Bewirtschaftung von Grund- und Oberflächenwasser regelt. Ziele der nachhaltigen Bewirtschaftung nach WHG sind der Erhalt der ökologischen Funktionen der Gewässer zum Wohl der Allgemeinheit und im Interesse Einzelner. Die Benutzung eines Gewässers, zu der auch Wasserentnahmen für verschiedene Verwendungszwecke gehören, bedarf der behördlichen Gestattung. Das WHG gibt bundesweit geltende Anforderungen vor, die durch die Bundesländer vollzogen werden.

Internationale Einbettung

Zur wissenschaftlichen Beurteilung der Phänomene Wasserknappheit und Wassermangel werden Daten zum Wasserdargebot und zur Wassernachfrage ins Verhältnis gesetzt. Internationale Einrichtungen wie zum Beispiel die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), die Europäische Kommission und die Europäische Umweltagentur werten deshalb nationale Daten unter bestimmten Gesichtspunkten aus, um Probleme im Wassersektor sichtbar zu machen und Maßnahmenempfehlungen ableiten zu können. Gleichzeitig fassen sie die Daten einzelner Staaten in internationalen Datenbanken zusammen und stellen diese als Informationsinstrument für alle interessierten Nutzer weltweit zur Verfügung. Die entsprechenden deutschen Daten zur Wassermenge werden im Rahmen der Aktion »Gemeinsamer Fragebogen von Eurostat und OECD zum Umweltzustand in den Mitgliedstaaten« in zweijährigem Rhythmus an die genannten Organisationen übermittelt. Diese Ergebnisse werden auch der Europäischen Umweltagentur und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen zur Verfügung gestellt.



Ressourcenbedarf

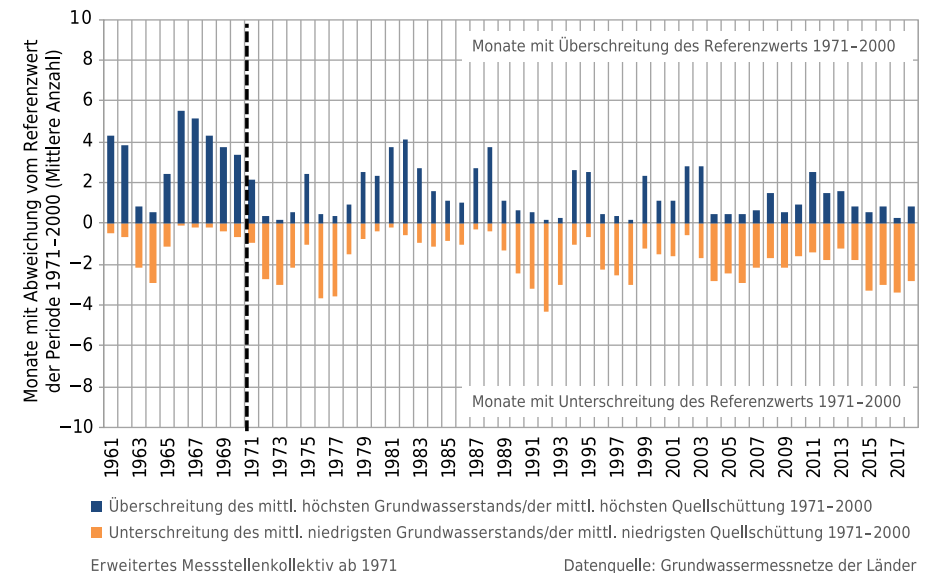
Eine Anpassung der Periodizität der Erhebung von nationalen Daten an die europäische Nachfrage nach jährlichen Daten ist wünschenswert.

4.3 Grundwasser

Grundwasser nimmt mit einem Anteil von 74 % eine übergeordnete Rolle bei der Trinkwasserversorgung in Deutschland ein. Es dient darüber hinaus der Beregnung und gewerblichen Nutzung. In der Natur bringt es grundwasserabhängige Landökosysteme hervor und speist die Quellen der Oberflächengewässer. Da die Grundwasserneubildung von der Witterung abhängt, ist das Dargebot ein wichtiger Indikator klimabedingter Veränderungen. Das Grundwasser wird in den Ländern intensiv quantitativ beobachtet.



Abweichung der Wasserstände von 136 Grundwassermessstellen in Deutschland vom Referenzwert der Periode 1971-2000



▲ Abb. 4.3-1: Anzahl der Monate mit Über- bzw. Unterschreitung des Referenzwertes (1971-2000) für den mittleren niedrigsten bzw. mittleren höchsten Grundwasserstand in den Jahren 1961-2018 (Quelle: UBA 2019)

Klimasignale

Um klimabedingte Veränderungen des Grundwasserstands möglichst räumlich differenziert zu erfassen, werden langjährige Messreihen vergleichbarer, repräsentativer Pegel benötigt. Eine Kleingruppe im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat im Rahmen eines UBA-FuE-Vorhabens im Jahre 2019 für den DAS-Monitoringbericht deutschlandweite Daten von 136 Pegeln ausgewertet, die anthropogen möglichst unbeeinflusst sind, den obersten Grundwasserleiter repräsentieren und ungespannte Druckverhältnisse aufweisen. Es liegen weitgehend

lückenlose, monatliche Daten seit mindestens 1971 vor.

Für jede Datenreihe wurden die langjährigen mittleren höchsten und niedrigsten Wasserstände und anschließend die Abweichung der Monatswerte (Monatsmittelwerte liegen über dem mittleren langjährigen höchsten bzw. unter dem mittleren langjährigen niedrigsten Grundwasserstand) berechnet. Wie in Abb. 4.3-1 zu sehen ist, nehmen die Monate mit Unterschreitung des Referenzwertes zu, während bei den Überschreitungen kein eindeutiger Trend erkennbar ist.

Gesetzliche Grundlagen

Eine wesentliche Grundlage für den Schutz des Grundwassers in Deutschland stellen die Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG (WRRL) der EU sowie die dazugehörige Tochterrichtlinie 2006/118/EG (Grundwasserrichtlinie, GWRL) dar. Auf nationaler Ebene regeln das Wasserhaushaltsgesetz und die Wassergesetze der Länder den Schutz des Grundwas-

sers. Die konkrete Ausführung der quantitativen und qualitativen Beobachtung und Bewertung des Grundwasserzustandes gibt die Grundwasserverordnung vor. Aufgrund von Befunden im Grundwasser von Nitrat, Pflanzenschutzmitteln (PSM) und deren Metaboliten sind auch die pflanzenschutz- und düngerechtlichen Vorgaben angepasst worden.

Messungen in Deutschland

Die Bundesländer betreiben schon seit vielen Jahrzehnten Messnetze zur Erfassung von Grundwasserstand und -beschaffenheit. Mit Inkrafttreten der Wasserrahmenrichtlinie und der Grundwasserrichtlinie wurden erstmals EU-weit die Grundsätze für die Bewirtschaftung der Grundwasserkörper sowie die Erfassung und Bewertung ihres mengenmäßigen und chemischen Zustands aufgestellt. Nach den Anforderungen der Grundwasserverordnung wird heute bundesweit ein dichtes Netz von Messstellen zur Erfassung von Menge und Beschaffenheit des Grundwassers betrieben. Nach Recherche in den einschlägigen Internetseiten und Veröffentlichungen betreiben die gewässerkundlichen Dienste der Bundesländer rund 21.500 Pegel zur Erfassung des Grundwasserstands. Hinzu kommt eine Vielzahl von Brunnen von privaten oder öffentlich-rechtlichen Einrichtungen, die beispiels-

weise als Vorfeldmessstellen der Wasserversorger oder zur Überwachung von Wasserhaltungen dienen. In Nordrhein-Westfalen sind es allein über 35.000 Messstellen.

Zur Beurteilung des mengenmäßigen und chemischen Zustands der Grundwasserkörper nach WRRL wurden in den Bewirtschaftungsplänen für den zweiten Bewirtschaftungszyklus (2016–2021) bundesweit insgesamt 12.804 Messstellen herangezogen (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2021), darunter 5.319 ausschließlich für den Grundwasserstand und 4.100 ausschließlich für die Beschaffenheit. An insgesamt 3.385 Messstellen wurden beide Komponenten gemessen.

Die Überwachungsdaten werden zunehmend automatisiert übertragen, mithilfe moderner Verfahren geprüft, ausgewertet und als amtliche Daten bereitgestellt. Die Mehrzahl der Bundesländer bieten bereits internetbasierte benutzerfreundliche Schnittstellen an,

Internationale Einbettung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ist eingebunden in das Projekt WHYMAP, das auf Initiative der UNESCO und der WMO in Kooperation mit dem International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC) durchgeführt wird und die Erstellung einer globalen Kartierung der Grundwasservorkommen

zum Ziel hat. Darauf basierend wird ein Geoinformationssystem aufgebaut, in dem alle grundwasserrelevanten Informationen digital verfügbar sind. Auf europäischer Ebene existiert seit 1998 das Informations-Netzwerk EURO-WATERNET, das von der European Environment Agency (EEA) in Zusammenarbeit mit den europäischen Ländern aufgebaut wurde.

Ressourcenbedarf

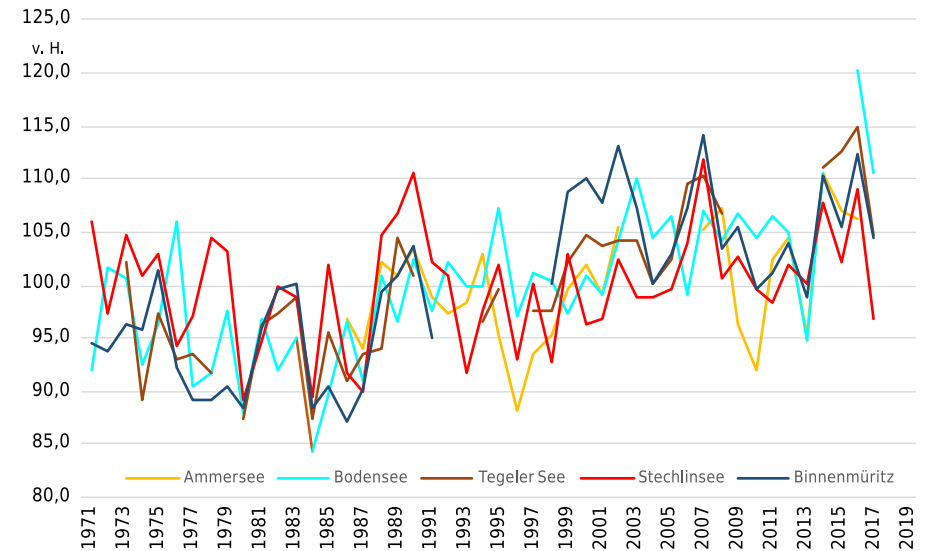
Die technischen Voraussetzungen zur Bereitstellung aktueller Stände repräsentativer Grundwasserpegel sind mit dem Pegelportal der Länder grundsätzlich bereits gegeben. Diese könnte mit der Administrationsoberfläche der jeweiligen Länderportale mit vertretbarem Aufwand erfolgen. Bei den betreffenden Daten handelt es sich um ungeprüfte Rohdaten der letzten zwei bzw. vier Wochen. Für die Verwendung als Essential Climate Variable (ECV) sind allerdings geprüfte Zeitreihen notwendig, die von den gewässerkundlichen Diensten herausgegeben werden. Der Aufwand und die Rahmenbedingungen für einen elektronischen Abruf dieser Daten müssten länderspezifisch ermittelt werden.

4.4 Seen

In Deutschland gibt es laut Umweltbundesamt über 12.000 Seen. Sie sind Wasserspeicher, Erholungsort und wichtiger Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Daher werden Seen nicht erst mit dem Inkrafttreten der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) der EU untersucht. Aufgrund ihrer ökologischen und physikalisch-chemischen Besonderheiten liefern sie wichtige Klimaindikatoren. Wasserstand, Wassertemperatur, Eisbedeckung sowie die biologischen Qualitätskomponenten wie z. B. Phytoplankton können der Bewertung aktueller klimabedingter Veränderungen dienen.



Entwicklung der Wassertemperaturen ausgewählter Seen in Deutschland 1971-2018



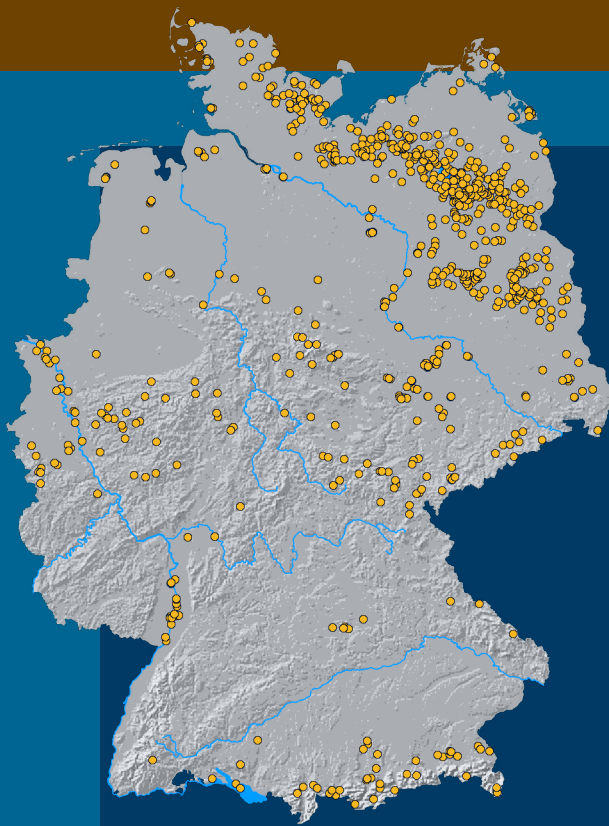
▲ Abb. 4.4-1: Entwicklung der Wassertemperaturen dargestellt als Verhältnis der Jahresmittelwerte (hydrologisches Jahr) zum vieljährigen Mittel (= 100 %) des jeweiligen Sees (Quelle: DWD nach den gewässerkundlichen Diensten der Bundesländer)

◀ Foto 4.4-1: Westufer des Krakower Obersees, Mecklenburg-Vorpommern

Klimasignale

Aufgrund des fehlenden expliziten gesetzlichen Auftrages gibt es langjährige Messreihen nur für wenige Seen in Deutschland. Vorhandene haben zudem Fehljahre, die teilweise auf fehlendes Interesse, Geld oder Personal, organisatorische oder technische Gründe zurückzuführen sind. Die Datenlücke an der Müritz (1992-1997) beruht auf der organisatorischen Neuordnung der Wasserwirtschaftsverwaltungen nach der politischen Wende in den ostdeutschen Bundesländern. In der Abbildung sind die Jahresmittel der Wassertemperaturen der hydrologischen Jahre

(1.11.-31.10.) ausgewählter Seen in Deutschland aufgezeichnet. Sie sind nicht als Absolutwerte, sondern im Verhältnis zum vieljährigen Mittel (1971-2018) (= 100 %) berechnet. Werte über 100 geben somit an, dass das Temperaturmittel eines Jahres über dem langjährigen Mittel liegt. Abb. 4.4-1 ist zu entnehmen, dass zwar jeder See individuell zu betrachten ist, sich aber überwiegend parallele Verläufe über die Jahre abzeichnen. Bei allen Zeitreihen ist seit Mitte der 1990er-Jahre ein ansteigender Trend zu verzeichnen.



◀ Abb. 4.4-2: Übersichtskarte von Deutschland mit allen 947 Messstellen in Seewasserkörpern, d. h. den berichtspflichtigen Wasserkörpern nach der Wasserrahmenrichtlinie der EU mit einer Wasserfläche größer als 50 ha. Die Probenahme erfolgt i. d. R. an der tiefsten Stelle. (Quelle: BfG)

Messungen in Deutschland

Seenuntersuchungen in Deutschland gehen auf das Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts zurück, wie die Geschichten des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) oder des Instituts für Seenforschung (ISF) zeigen. Mit Inkrafttreten der EG-WRRRL entstand erstmals die Verpflichtung zu ihrer regelmäßigen und systematischen physikalisch/chemischen und biologischen Untersuchung. Insgesamt unterliegen 730 Wasserkörper der rund 12.000 Seen in Deutschland mit rund 950 Messstellen der Berichtspflicht nach WRRRL. Der Untersuchungsumfang ist

unter <https://gewaesser-bewertung.de> beschrieben. Untersuchungsfrequenz (sechsmal pro Jahr) und -zeitraum (April–Oktober) erfüllen jedoch nicht die Anforderungen, die von GCOS für die ECV Seen beschrieben wurden. Die beste Datengabe gibt es in Deutschland zum Wasserstand und zur Wassertemperatur nur für eine geringe Zahl von Seen, wie die Kleingruppe Klimaindikatoren im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) aktuell ermittelte. Insbesondere die älteren Datenreihen weisen stellenweise Lücken auf und beruhen auf einer täglichen oder monatlichen Stichprobe. Parameter wie Flächenausdehnung und Eisbedeckung von Seen werden derzeit nicht flächendeckend und systematisch erhoben.

Zeitlich höher aufgelöste Messwerte zu Wasserstand oder Wassertemperatur von Seen gibt es seit Einführung automatischer Messeinrichtungen und in den letzten Jahren zunehmend mit Datenfernübertragung. Sie werden wie die Messwerte an Fließgewässern durch die gewässerkundlichen Dienste der Länder erfasst und aktuell bereitgestellt. Gemein-

same Plattform der Länder ist das Länderübergreifende Pegelportal. Aber auch diese Messdaten sind nicht ohne Kenntnis der Rahmenbedingungen uneingeschränkt als Beitrag zu dieser ECV heranzuziehen. Der Wasserstand wird in den meisten beobachteten Seen reguliert, wodurch das Klimasignal auf den Wasserstand verfälscht werden kann. Die Wassertemperatur dient an Pegeln mit Drucksonde der Messwertkorrektur und ist insofern oft nicht geeicht.

Den Anforderungen des GCOS Implementation Plan 2016 kommen die satellitengestützt ermittelten Messdaten am nächsten. Hier sind insbesondere die Datenprodukte der Sentinel-Missionen (Copernicus) zu nennen. Aktuelle Forschungsarbeiten liefern vielversprechende Ergebnisse für Temperatur, Eisbedeckung, Sichttiefe und Chlorophyll. Allerdings können diese Daten nur für größere Seen herangezogen werden. Messungen des Wasserstands sind aufgrund der bisher zu geringen Abdeckung von Radardaten nur für ausgewählte Seen möglich.

Gesetzliche Grundlagen

Den Schutz der Seen in Deutschland regeln das Wasserhaushaltsgesetz und die Wassergesetze der Länder. Sie setzen u. a. die Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG in nationales Recht um. Die Mindestanforderungen für die Erfassung und Bewertung des ökologischen und chemischen Zustands der Seen sind in der Oberflächengewässerverordnung geregelt. Die Erfassung der ECV Seen (Wasserstand, Temperatur, Eisbedeckung, Wasserspiegelausdehnung) sind jedoch nicht unmittelbar gesetzlich geregelt, sodass langjährige und vollständige Datenreihen nicht oder selten vorliegen.

Internationale Einbettung

Auf europäischer Ebene existiert seit 1998 das Informationsnetzwerk EURO-WATERNET, das von der European Environment Agency (EEA) in Zusammenarbeit mit den europäischen Ländern aufgebaut wurde. Seit 2020 wird die Arbeit des GCOS-Sekretariats von der EU unterstützt und kann insbesondere bei den Fernerkundungsprodukten auf die Infrastruktur und Dienstleistungen des Copernicus-Erdbeobachtungsprogramms zurückgreifen. Im Rahmen des WRRRL-Monitorings erfasste Daten zur ökologischen und chemischen Beschaffenheit von Seen können über das Water Information System for Europe (WISE) europaweit abgerufen werden. Eine globale Datenbasis für rund 550 Seen weltweit bietet das ■ ■ ■



Datenzentrum HYDROLARE. Dort fließen auch die Daten von Hydroweb ein, das satellitenbasiert ermittelte kontinuierliche Langzeitserien der Wasserstände von 80 Seen über 100 km² Größe und von den 20 größten Flüssen der Welt liefert.

Ein internationales Forschungsteam unter Leitung des US-amerikanischen Rensselaer Polytechnic Institute und Beteiligung des IGB Berlin analysierte insgesamt über 45.000 Sauerstoff- und Temperaturprofile von fast 400 Seen weltweit. Danach ist der Sauerstoffgehalt in den untersuchten Seen seit 1980 um 5,5 % an der Oberfläche und um 18,6 % in der Tiefenzone gesunken.

◀ Foto 4.4-2: Boot am Tiefwareensee, Mecklenburg-Vorpommern, vollgepackt mit Ausrüstung zur Probenahme

Ressourcenbedarf

Aktuelle Wasserstände und Temperaturen von Seen werden bereits heute über die Pegelportale der Länder veröffentlicht und können auch mobil über die App »Meine Pegel« abgerufen werden. Dabei handelt es sich um ungeprüfte Rohdaten der letzten zwei bzw. vier Wochen. Für die Verwendung als Essential Climate Variable (ECV) wären geprüfte, längere Zeitreihen notwendig, die von den gewässerkundlichen Diensten herausgegeben werden. Der Aufwand und die Rahmenbedingungen für einen elektronischen Abruf dieser Daten müssten länderspezifisch ermittelt werden.

gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/lakes <https://gwaesser-bewertung.de>

water.europa.eu d-copernicus.de pegelportal.de hochwasserzentralen.info/meinepegel

hydrolare.net theia-land.fr/en/hydroweb igb-berlin.de/news/klimaerwaermung-seen-verlieren-zu-viel-sauerstoff

4

Terrestrische Beobachtungen



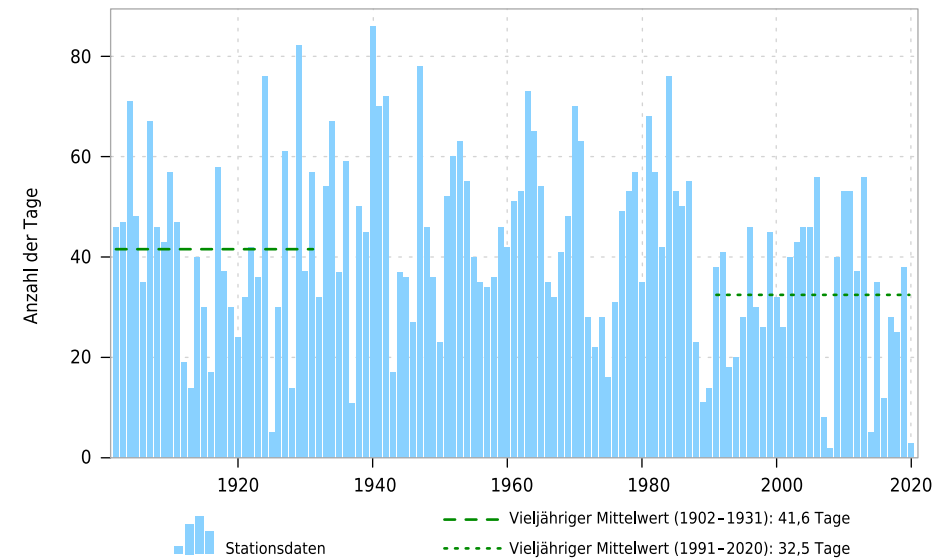
Kryosphäre

4.5 Schneedecke

Die Schneedecke stellt einen wesentlichen Einflussfaktor für das Klima dar. Daher sind die Parameter Schneehöhe und Neuschneehöhe sowie die verwandten Parameter Schneedeckenart, Erdbodenzustand und Wasseräquivalent im Rahmen der anthropogenen Klimaerwärmung von besonderem Interesse und von spezieller Bedeutung in den Bereichen Tourismus, Wasserwirtschaft und Verkehr sowie für die Abschätzung von Schneelasten im Bauwesen.



Tage mit einer Schneedecke in München in den Jahren 1902-2020



▲ Abb. 4.5-1: Tage mit Schneedecke im meteorologischen Winter (Dezember, Januar, Februar) an der Station München im Zeitraum von 1902 bis 2020 (Quelle: DWD)

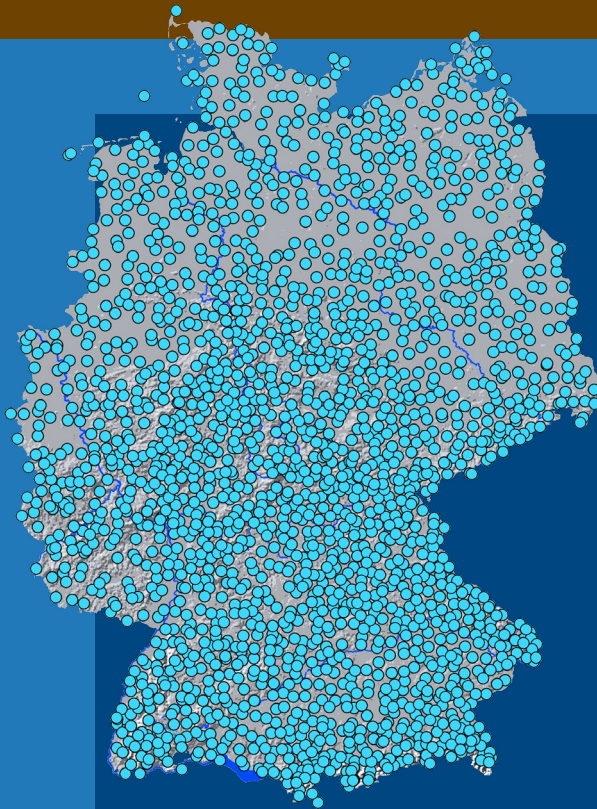
Klimasignale

Im Rahmen der allgemeinen klimatischen Erwärmung ist eine Abnahme der Dauer der Schneebedeckung an den meisten Stationen festzustellen, wobei jedoch sehr große Schwankungen von Jahr zu Jahr auftreten, die natürlich auch von der jeweiligen gesamten Niederschlagshöhe abhängen, die ebenfalls stark variiert. Zudem können einzelne Ausreißer auftreten, die aber am generellen Trend zu geringerer Schneebedeckung, speziell in den letzten Jahrzehnten, nichts ändern.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4) hat der DWD die Aufgabe, die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre sicherzustellen und den Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme durchzuführen.

Die Messreihen stehen gemäß den Regelungen des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst (§ 6) und der Geodatennutzungsverordnung (GeonutzV) als offener Datenbestand zur Verfügung.



◀ Abb. 4.5-2: Karte mit Orten, an denen die Schneehöhe und andere Schneedaten gemessen werden (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Bodenbeobachtungsnetz von Messstationen, die in Wetter- und Niederschlagsstationen kategorisiert werden. Wie im Fall des Niederschlags ist aufgrund der hohen räumlichen Variabilität auch bei der Schneedecke ein dichtes Messnetz erforderlich. Gegenwärtig werden an rund 1.800 Stationen zumindest tägliche Messungen der Schneehöhe durchgeführt. Für die Vergangenheit variiert die

Zahl der verfügbaren DWD-Stationen mit Schneemessungen in Abhängigkeit von der Zeit bzw. dem Messprogramm. Im Mittel reichen die Messungen der Schneeparameter ca. 70 Jahre zurück. Vor 1950 gibt es nur wenige Zeitreihen und vor 1935 sind sogar nur noch einzelne Zeitreihen von digitalisierten Schneemessungen im Datenarchiv verfügbar. Zeitlich höher aufgelöste Schneemessungen werden aktuell nur an ca. 180 Stationen durchgeführt, an denen die Schneehöhe mithilfe von Schneehöhensensoren alle 10 Minuten bestimmt wird.

Von den Beobachtern wurde im Wesentlichen die Gesamtschneehöhe manuell auf dem Schneebrett mittels Schneepegel oder Zollstock bestimmt. Mit Einführung von automatischen Stationen wurden die manuellen Messungen durch Schneehöhensensoren ersetzt, bei denen die Messung der Schneehöhe durch eine ultraschall- oder laserbasierte Distanzmessung erfolgt. Bei der Nutzung dieser Zeitreihen ist zu beachten, dass diese Sensormessungen nur an einem Geländepunkt erfolgen, wohingegen manuelle Messung an

mehreren Punkten des Stationsgeländes erfolgten und über diese Messungen gemittelt wurde.

Neben den bereits digital verfügbaren Zeitreihen liegen weitere Daten von Schneemessungen in Papierform vor, die im Rahmen verschiedener Projekte digitalisiert werden. So wurden insbesondere während der zurückliegenden Jahre Schneehöhen von einigen hundert Stationen digitalisiert, um eine verbesserte Datenbasis für die Abschätzung von Schneelasten für das Bauwesen bereitzustellen.

Neben den DWD-Stationen gibt es weitere Schneemessungen von anderen Institutionen und Einzelpersonen, die aber nur zu einem geringen Teil in die Datenbank des DWD einfließen, weil sie oft die Anforderungen an Repräsentanz, Messprogramm und Dauerhaftigkeit des Betriebs nicht erfüllen.

Satellitendaten bieten in Kombination mit den Stationsmessungen das Potenzial, flächendeckende Datensätze der Schneebedeckung auch in hoher zeitlicher Auflösung bereitzustellen. Hierzu laufen Forschungsaktivitäten im Deutschen Wetterdienst.

Internationale Einbettung

Von 180 Stationen werden routinemäßig synoptische Meldungen weltweit verbreitet. Von einer Auswahl dieser Stationen werden auch monatliche klimatologische Informationen in Form von CLIMAT-Meldungen bereitgestellt. Die Stationen Frankfurt, Hamburg, Hohenpeißenberg und Lindenberg sind Teil des GCOS Surface Network.

Ressourcenbedarf

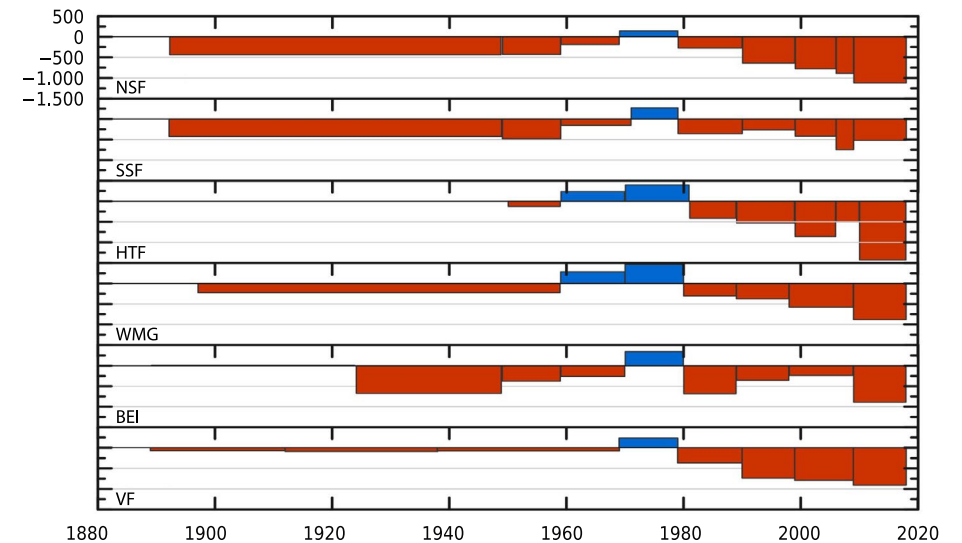
Das Messnetz des DWD wurde weitestgehend automatisiert. Der Betrieb der bestehenden Messstationen ist im Wesentlichen als gesichert anzusehen.

4.6 Gletscher und Permafrost

Die Ergebnisse der alpinen Gletscherforschung liefern klare Belege für die Änderung des Klimas. Während der Gletscherrückgang in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts noch auf nicht-anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden kann, belegt der rapide Schwund der letzten 40 Jahren den Einfluss des Menschen auf Gletscher und Klima. Dies hat auch Auswirkungen auf den Permafrost im Gebirge.



Zeitreihen der geodätisch bestimmten Massenbilanzen für die fünf bayerischen Gletscher und den Vernagtferner in Österreich



NSF = Nördlicher Schneeferner SSF = Südlicher Schneeferner HTF = Höllentalferner WMG = Watzmanngletscher
BEI = Blaueis (bei Berchtesgaden) VF = Vernagtferner (Österreich)
■ Massengewinn ■ Massenverlust

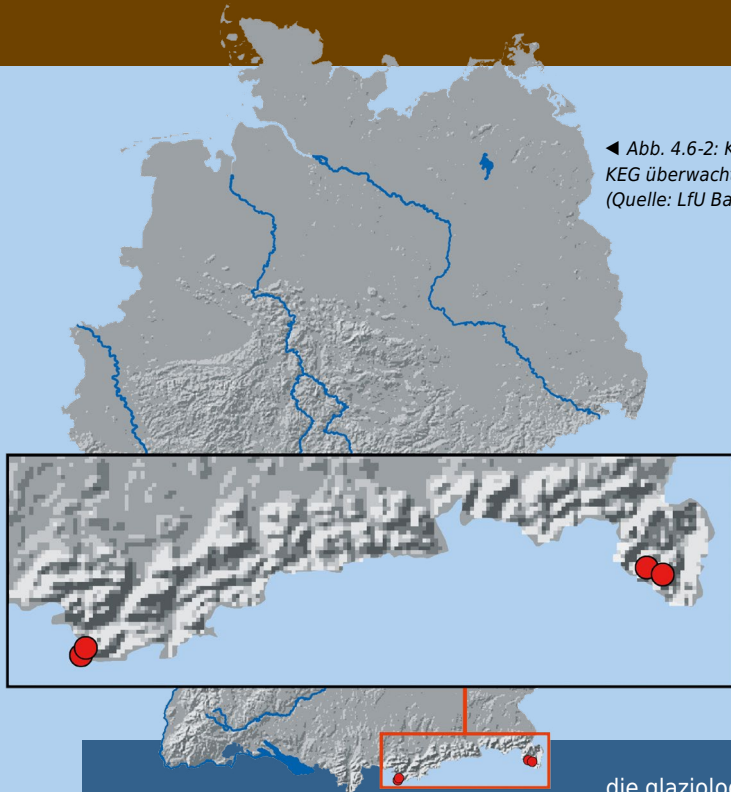
▲ Abb. 4.6-1: Die Balkenhöhe entspricht der durchschnittlichen jährlichen Massenänderung (Einheit: mm Wasseräquivalent pro Jahr) für den angegebenen Zeitraum, berechnet aus der Höhenänderung in m/a unter Verwendung einer mittleren Dichte des Eises von 900 kg/m^3 . Man erkennt deutlich die Phase mit Massengewinnen der Gletscher (blaue Farbbalken) in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, die Zeiträume mit Massenverlusten (rote Farbbalken) seit 1889 und nach 1980 und die ausgeglichene Bilanz von 1889 bis 1924 für das Blaueis. In der untersten Reihe sind die Werte für den Vernagtferner im Ötztal, Österreich angegeben (vgl. Beitrag 6.2). (Quelle: LfU Bayern)

◀ Foto 4.6-1: Aufnahme des Zugspitzplatts mit Nördlichem Schneeferner vom August 2011

Klimasignale

Die Kartenaufnahmen der Bayerischen Gletscher, die für die Berechnung der geodätischen Massenbilanz verwendet werden, beginnen im Jahr 1889 (Blau-eis), 1892 (Nördlicher und Südlicher Schneeferner) und 1897 (Watzmann-gletscher). Die kürzeste Reihe liegt für den Höllentalferner für den Zeitraum

seit 1949 vor. Die Veränderung des Gletschervolumens wird bei der »geodätischen« Methode mithilfe der Differenz zwischen zwei Höhenmodellen ermittelt. Während das Blaueis der nördlichste Gletscher in den Nordalpen ist, zeigt der Watzmann-gletscher mit 2.060 m die niedrigste mittlere ■■■



◀ Abb. 4.6-2: Karte mit den von der KEG überwachten Gletschern in Bayern (Quelle: LfU Bayern)

Messungen in Deutschland

Die KEG überwacht alle bayerischen Gletscher – Nördlicher und Südlicher (bis 09/2022) Schneeferner, Höllentalferner auf der Zugspitze sowie Watzmann und Blaueis im Berchtesgadener Land – periodisch mit der geodätischen Methode. Aus dem Vergleich von geodätischen Messungen (digitale Höhenmodelle) über Zeiträume von etwa zehn Jahren ergeben sich Veränderungen der Gletscherfläche, der Oberflächenhöhe und, unter Annahme einer mittleren gletscherweiten Dichte, der Massenbilanz (siehe Abb. 4.6-1). Für den Zeitraum 1962/63 bis 1968/69 wurde am Nördlichen Schneeferner zusätzlich

die glaziologische Methode angewandt. Dieses Verfahren ermittelt jährliche Massenbilanzsummen für das glaziologische Haushaltsjahr (vom 1. Oktober bis 30. September des Folgejahres), indem die Differenz zwischen Massenzunahmen (hauptsächlich durch Niederschläge im Winter) und -verlusten (hauptsächlich durch Schmelze im Sommer) berechnet wird. Für alle bayerischen Gletscher liegen Eisdickenmessungen vor, die zwischen 2006 und 2010 mittels Bodenradar ermittelt wurden.

Permafrost, also dauerhafte Temperaturen unter 0 °C im Untergrund, spielt in Bayern nur eine geringe Rolle. Sein Auftauen kann zu Steinschlag, Felssturz oder Setzungen und somit zu Schäden



Höhe (Mayer et al. 2021). Alle Gletscher in Bayern zeigen seit dem Ende des 18. Jahrhunderts einen extremen Massenverlust. Die vergletscherte Fläche reduzierte sich seitdem von 2,5 Mio m² auf weniger als 0,45 Mio m², eine Abnahme von etwa 82 %. In der Beobachtungsperiode 2009 bis 2018 nahm die mittlere Eisdicke um etwa 7,6 m ab (–46 %), was einem Massenverlust von fast 66 % entspricht (Mayer et al. 2021). Die Veränderungen korrelieren gut mit Beobachtungen an anderen Gletschern der Ostalpen (siehe Beitrag 6.2) und auch mit dem beobachteten Anstieg

der mittleren Sommertemperatur (JJA) am Zugspitzgipfel von etwa 2 °C während der letzten 40 Jahre.

Für die Dokumentation der Entwicklung des Permafrosts wurde ein Klimaindikator eingeführt (Maximalwert des Tagesmittels des Temperatursensors in 23,65 m Abstand von der Südwand des Zugspitzgipfels im meteorologischen Jahr). Dieser Wert hat sich in den letzten 10 Jahren bei einem weitgehend linearen Trend um etwa 0,4 Kelvin von –1,14 °C (2011) auf –0,73 °C (2020) erhöht.

Gesetzliche Grundlagen

Die Gruppe Erdmessung und Glaziologie (KEG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (BAW) ist die einzige nationale Institution, die das Verhalten der deutschen Gletscher langfristig untersucht. Rechtliche Grundlage für die Forschung der Kommission sind die §§ 2 Abs. 1 bis 3 und 19 Abs. 2 der Satzung der BAW. Die Beobachtung des Permafrosts fällt in die gesetzliche Zuständigkeit des LfU (Gesetz über das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfUG), Art. 1).



Internationale Einbettung

Resultate der Gletschermessungen der Kommission werden laufend in den beiden wichtigsten Publikationsserien für glaziologische Daten veröffentlicht. Diese Serien werden herausgegeben vom World Glacier Monitoring Service (WGMS) in Zürich, Schweiz, und vom Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR) bzw. National Snow and Ice Data Center (NSIDC) in Boulder, USA. Damit stehen die deutschen Ergebnisse für die wichtigsten internationalen Organisationen (UNEP, WMO, UNESCO und ISC) zur Verfügung. Eine enge Zusammenarbeit besteht mit Universitäten in Innsbruck, Österreich, in Zürich, Schweiz und Mailand, Italien.

Gemeinsame Forschungsprojekte werden mit nationalen und internationalen Gruppen in Zentralasien durchgeführt. Die flächenhaften Permafrostuntersuchungen wurden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in Zusammenarbeit mit Universitäten, Ämtern und Ministerien in Österreich, der Schweiz, Italien und Frankreich im Rahmen von PermaNET-BY durchgeführt. Der Betrieb der Permafrost-Messstation am Zugspitzgipfel erfolgt im Rahmen des Konsortiums der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS).

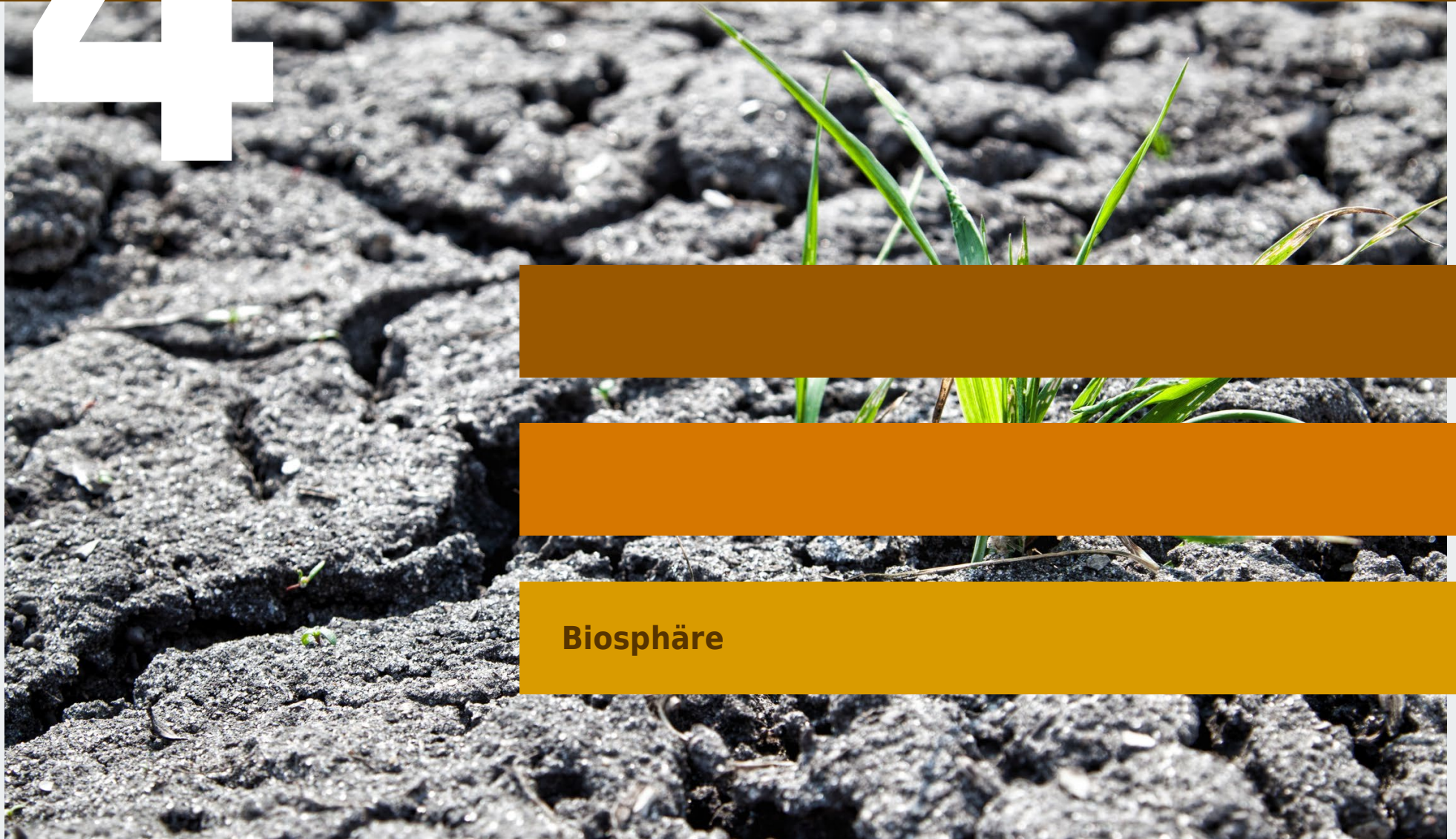
Ressourcenbedarf

Die glaziologischen Arbeiten an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften werden durch den Freistaat Bayern finanziert. Zusätzlich werden Mittel aus externen Quellen requiriert (z. B. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz).

◀ Foto 4.6-2: Entnahme von Schneeproben für die Dichtebestimmung der Schneedecke im Frühjahr

4

Terrestrische Beobachtungen



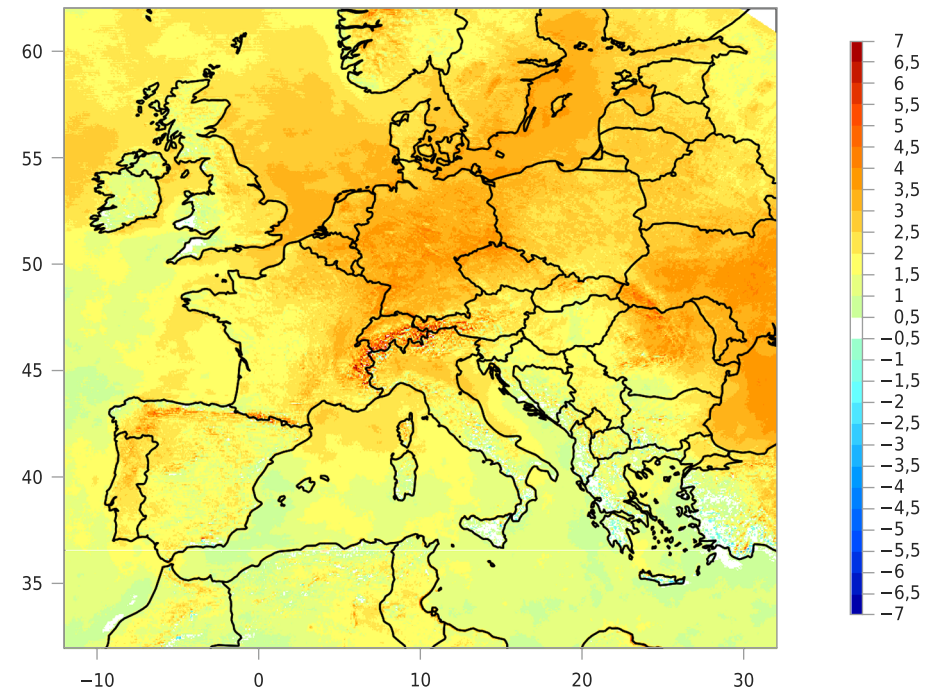
Biosphäre

4.7 Albedo

Die Bodenalbedo stellt eine wichtige Größe der Strahlungsbilanz am Erdboden dar. Trends in der Bodenalbedo beeinflussen die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung und somit auch das Klimasystem. Die effektive Wolkenalbedo (Mueller et al. 2011) wiederum beschreibt die Änderung der Rückstreuung der solaren Strahlung durch die Wolken relativ zum wolkenlosen Fall. Selbst ein geringer Trend von wenigen Prozent in der effektiven Wolkenalbedo würde die gleiche Größenordnung wie der anthropogen verursachte Treibhauseffekt haben. Eine langfristige Änderung hätte daher erhebliche Folgen für die Interpretation von Temperaturmessungen.



Trend der solaren Einstrahlung in $W/m^2/Dekade$, SARAH-2.1 und ICDR, 1983-2020



▲ Abb. 4.7-1: Trend in der solaren Einstrahlung in Europa (1983-2020) in Watt pro Quadratmeter und Dekade resultierend aus der langzeitlichen Änderung der effektiven Wolkenalbedo (Quelle: CM SAF)

Klimasignale

Das CM SAF (Satellite Application Facility on Climate Monitoring, vergleiche Beitrag 5.8) bietet mittlerweile eine Zeitreihe der Bodenalbedo und der effektiven Wolkenalbedo über drei Dekaden an. Auch über das Projekt European Reanalysis and Observations for Monitoring (EURO4M) sind Klimadaten der Albedo erhältlich. Lange Zeitreihen der Bodenalbedo ermöglichen die Analyse von Trends und Extremen. Extreme sind in Deutsch-

land in der Regel durch die Variation der Schneebedeckung in der Wintersaison bedingt. Dies mag eine Ursache sein, dass für Deutschland kein eindeutiger Trend in der Bodenalbedo erkennbar ist. Allerdings waren 2017, 2018, und 2019 extreme Dürresommer, was ein Indiz für den Klimawandel sein kann und bei Zunahme der Dürresommer perspektivisch zu einer Erhöhung der Bodenalbedo in Deutschland führen könnte. ■ ■ ■



In der effektiven Wolkenalbedo hingegen sind deutliche Trends vorhanden. Das Kartenbeispiel (Abb. 4.7-1) zeigt, dass diese klimatischen Änderungen der Wolkenalbedo zu Trends in der solaren Einstrahlung in der Größenordnung von mehreren W/m^2 pro Dekade führen können. Dennoch wurde diese Größe bisher kaum in der Klimaüberwachung berücksichtigt. Ein wesentlicher Grund war die bisher fehlende Datenbasis. Die Wolkenalbedo kann nicht mittels Bodenmessungen bestimmt werden. Klimazeitreihen der Wolkenalbedo sind aber seit einigen Jahren beim CM SAF erhältlich.

Gesetzliche Grundlagen

Die Arbeiten des CM SAF sind einerseits eingebettet in die gesetzlichen Rahmenbedingungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), andererseits bestimmt durch die Vertragsvereinbarungen zwischen der Europäischen Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten (EUMETSAT) und dem DWD. Die Arbeitsinhalte des CM SAF beinhalten die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre, sowie der Bereithaltung, Archivierung, Dokumentierung und Abgabe meteorologischer

und klimatologischer Geodaten und Dienstleistungen und entsprechen damit dem § 4 Abs. 1 Nr. 4 und 9 des Gesetzes über den DWD. Die detaillierte Arbeitsplanung und Ausgestaltung der konkreten Arbeitsinhalte wird im Kontext dieser Zielvorgaben im Rahmen eines jeweils fünfjährigen Vertrags zwischen EUMETSAT und dem DWD unter Einbindung der jeweiligen Partner des CM SAF ausgestaltet.

Internationale Einbettung

Die Produkte und Verfahren des CM SAF stehen nicht nur im Einklang mit den Zielen des GCOS, sondern haben auch Bedeutung für andere internationale Programme, wie dem World Climate Programme (WCP) und dem World Climate Research Programme (WCRP). Sie sind für die Aktivitäten innerhalb der Group on Earth Observations (GEO) und des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus essentiell. Darüber hinaus ist das CM SAF auch an europäischen Aktivitäten, wie der Climate Change Initiative der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), und in verschiedenen EU-Projekten (z. B. EURO4M) beteiligt.

Messungen in Deutschland und Europa

Flächendeckende Daten der Bodenbedo sind im Wesentlichen nur aus Satellitendaten oder Reanalysedaten in hinreichender Qualität verfügbar. Die Reanalysedaten weisen bisher eine recht grobe räumliche Auflösung auf ($\geq 30 \text{ km}^2$, ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)). Räumlich hoch aufgelöste flächendeckende Daten sind daher zurzeit nur aus Satellitenbeobachtungen vorhanden. In Europa stellen die von den Wetterdiensten und EUMETSAT finanzierten Satellite Application Facilities (SAFs) qualitativ hochwertige Daten der Bodenbedo in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zur Verfügung, für zeitnahe Daten das SAF zur Analyse der Landoberfläche (LSA SAF).

Des Weiteren liefert das SAF für Ozean und Meereis (OSI SAF) Informationen über die Eisbedeckung und damit indirekt auch über die Bodenbedo.

Längere Zeitreihen der Bodenbedo, welche die Grundlage für eine klimatologisch relevante Trend- und Extremwertanalyse sind, werden in Europa zurzeit nur von dem CM SAF und EUMETSAT (Govaerts 2008) zur Verfügung gestellt.

Die Erstellung von Rasterdaten aus Bodenmessungen ist aufgrund der geringen Dichte an Messstationen nicht in vergleichbarer Qualität möglich. Es existiert in Deutschland nur eine gut gewartete Messstation mit Langzeitdaten für Bodenbedo (Falkenberg), die vom DWD betrieben wird.

Flächendeckende Daten der effektiven Wolkenalbedo sind nur aus Satelliten- oder Reanalysedaten in hinreichender Qualität verfügbar. Entsprechende Klimazeitreihen sind über das CM SAF verfügbar. Die Satellitendaten der Wolkenalbedo weisen eine höhere Auflösung auf und es kann angenommen werden, dass ihre Genauigkeit besser ist als die der Reanalysedaten.

Ressourcenbedarf

Ein generelles Problem besteht darin, dass es an Kapazitäten zur fachgerechten Analyse der auflaufenden Datensätze fehlt. Hierzu trägt auch die fehlende Grundfinanzierung von Stellen an den Universitäten wesentlich mit bei, welche eine nachhaltige Forschung kaum noch ermöglicht. Für die Erstellung einer langen Albedo-Zeitreihe aus Satellitendaten werden ca. 48 Personenmonate benötigt. Des Weiteren werden mehrere Terabyte Platz auf Speichermedien benötigt. Zur einmaligen Analyse des Datensatzes sind wiederum ca. 48 Personenmonate notwendig.

4.8 Kohlenstoff im Boden

Wälder spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf, da Pflanzen durch die Photosynthese Kohlendioxid aufnehmen und in Form von Kohlenstoff in der Biomasse fixieren. Etwa die Hälfte davon wird durch Respiration der Pflanzen wieder an die Atmosphäre abgegeben. Der verbleibende Kohlenstoffanteil gelangt nach dem Absterben der Pflanzenbestandteile z. B. in Form von Blattstreu oder Wurzelstreu in den Boden. Böden sind das größte Reservoir im aktiven Kohlenstoffkreislauf terrestrischer Ökosysteme. Schätzungen zeigen, dass weltweit bis in eine Tiefe von 1 m ca. $1,5 \times 10^{12}$ Tonnen Kohlenstoff gespeichert sind (Jobbágy und Jackson 2000). Dabei stellen Feuchtgebiete und Moore die größten Kohlenstoffspeicher dar.



Klimasignale

Die Höhe des als organische Substanz im Boden verbleibenden Kohlenstoffs ist von der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit abhängig. Somit sind Höhe und Veränderungen von Kohlenstoffvorräten wesentlich vom Klima und durch Klimaänderungen beeinflusst. Größere Änderungen des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs durch eine Freisetzung von Kohlendioxid oder Methan in die Atmosphäre können wiederum erhebliche Auswirkungen auf das Klima haben. Anhand der Daten der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald) konnten Kohlenstoffvorräte für Deutschland hochgerechnet und die jährlichen Veränderungsraten zwischen den Erhebungen bestimmt werden. Im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar wird auf dieser Grundlage eine jährliche Kohlenstoffvorratsänderung von $0,41 \pm 0,11$ Tonnen angegeben (Grüneberg et al. 2014). Die Daten zur Vorratsänderung wurden zwar in den nationalen Inventarberichten dargestellt, sind jedoch nicht bei der Anrechnung berücksichtigt. Eine kontinuierliche Fortschreibung der Ergebnisse ist nach aktuellem Kenntnisstand problematisch. Mit der anstehenden dritten BZE-Wald werden neue Erkenntnisse über Änderungsraten des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs voraussichtlich ab 2026 vorliegen. Aufgrund der bisher einmaligen Durchführung der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) konnte noch kein Trend abgeleitet werden.

Gesetzliche Grundlagen

Als Folge der Waldschadensdiskussion wurde Ende der 1980er-Jahre die bundesweite BZE-Wald etabliert, die mittlerweile integraler Bestandteil des forstlichen Umweltmonitorings ist. Entsprechend der föderalen Struktur der Bundesrepublik erheben die Bundesländer zwar die Daten, doch werden diese vom Thünen-Institut für Waldökosysteme zur bundesweiten Auswertung zusammengestellt. Seit der Gesetzesnovelle im Jahr 2010 sieht das Bundeswaldgesetz (§ 41a) vor, dass das BMEL Daten zur Nährstoffversorgung und Schadstoffbelastung der Waldböden durch Rechtsverordnung mit Zustimmung der Länder erheben kann. Eine entsprechende Rechtsverordnung für die dritte BZE-Wald liegt seit 2020 vor. Für die BZE-LW existiert zwar keine gesetzliche Regelung, doch wurde im Einvernehmen mit dem BMEL das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz mit der Durchführung beauftragt. Deutschland hat sich entsprechend der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) verpflichtet, über die anthropogenen Quellen und Senken von Treibhausgasen sowie über Änderungen von Kohlenstoffvorräten in Böden und in der Biomasse zu berichten (UNFCCC Art. 3.3, 4.1). Diese Verpflichtung schließt landwirtschaftlich genutzte Böden ein. Die internationalen Regelwerke des Weltklimarats (IPCC) verlangen nationale Daten für die Hauptquellgruppen. Dazu gehören in Deutschland land- und forstwirtschaftlich genutzte Böden ebenso wie Siedlungsflächen und entsprechende Landnutzungsänderungen. Weiterhin ■ ■ ■



Diff. C_{org} [t ha⁻¹a⁻¹]



▲ **Abb. 4.8-1:** Jährliche Veränderungsrate der organischen Kohlenstoffvorräte in den oberen 30 cm des Mineralbodens in den Wäldern Deutschlands zwischen 1990 und 2006 (Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme)

Messungen in Deutschland

Die BZE-Wald hat zum Ziel, Zustand und Entwicklung von Waldökosystemen und die Analyse von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen zu beobachten. Hierfür wird auf einem landesweit repräsentativen und systematischen Stichprobennetz von 8 × 8 km die gesamte Waldfläche Deutschlands erfasst. Die erste Erhebung fand bereits in den Jahren 1987 bis 1993 an 1.936 Stichprobenpunkten statt. In den Jahren zwischen 2006 und 2008 erfolgte auf 1.859 Aufnahme- und Wiederholungspunkten eine Wiederholungsinventur. Mit der zwischen 2011 und 2018 durchgeführten BZE-LW wurde erstmalig eine deutschlandweite, konsistente und repräsentative Inventur der Kohlenstoffvorräte in den obersten 100 cm landwirtschaftlich genutzter Böden durchgeführt. An insgesamt 3.104 Stichprobenpunkten auf Acker-, Grünland und Sonderkulturflächen wurde der Bodenkohlenstoffvorrat bestimmt. Die Standortwahl erfolgte ebenfalls auf Grundlage eines repräsentativen und systemati-



ist die BZE-Wald in die Berichterstattung des Internationalen Kooperationsprogramms zur Erfassung und Überwachung der Auswirkungen von Luftverunreinigung auf Wälder (UNECE ICP Forests) eingebunden. Sie liefert außerdem Informationen für eine Umsetzung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (insb. § 9) im Sinne einer Gefahrenabwehr bei schädlichen Bodenveränderungen.

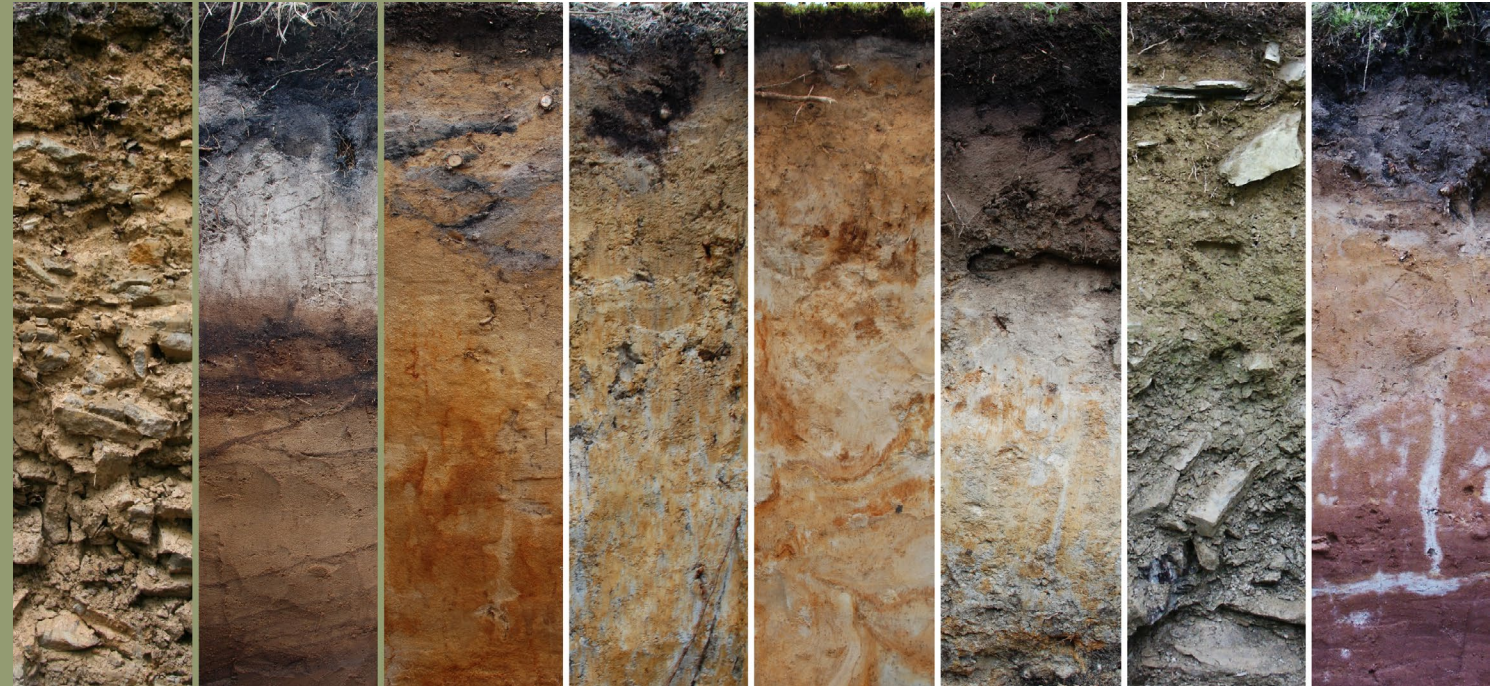
schen 8 × 8-km-Rastern über ganz Deutschland. Die Ergebnisse der zweiten BZE-Wald (Wellbrock et al. 2016) und der ersten BZE-LW (Jacobs et al. 2018) geben einen Überblick über den aktuellen Zustand der meisten Böden Deutschlands. Zusätzlich beteiligt sich Deutschland mit einem eigenen Beitrag am europäischen Messnetz (ICOS) mit insgesamt 18 Standorten auf Acker, Grünland, Wald und Moor. Neben Treibhausgasmessungen (Eddy-Kovarianz-Methode) wird auf diesen Standorten auch die Änderung von Bodenkohlenstoffvorräten z. T. seit 2001 erfasst. Die von den Bundesländern durchgeführte Bodendauerbeobachtung umfasst rund 780 Basisbeobachtungsflächen und 100 Intensivbeobachtungsflächen auf Acker, Grünland, Forst und Sonderkulturen, z. T. auch im Siedlungsbereich. Die meisten Bodendauerbeobachtungsflächen existieren seit den 80er- bzw. frühen 90er-Jahren und der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden wird etwa alle 5 Jahre erfasst.

Internationale Einbettung

Auf europäischer Ebene werden im Rahmen des ICP Forests vergleichbare Daten im 16 × 16-km-Raster als Unterstichprobe der BZE-Wald ausgewertet. Die Methoden der Erhebung sind in einem Handbuch festgelegt (UNECE ICP Forests 2016). Eine Vergleichbarkeit der Daten wird durch die regelmäßige Beteiligung an internationalen Ringtests gesichert. Die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention betreiben z. T. vergleichbare Inventur-/Monitoring-Programme, jedoch ohne anerkannte international standardisierte Methodik. Auf europäischer Ebene entstand mit LUCAS eine einheitliche Datengrundlage auch zu Kohlenstoffvorräten in Böden. Ziel des Projekts ist die Erstellung eines harmonisierten Datensatzes zur Landbedeckung und zur Landnutzung innerhalb der EU. Bisher erfolgten vier Erhebungen, wobei die erhobenen Parameter, teilweise auch die Lage der beprobten Punkte und die Art der Probenahme, mehrfach angepasst wurden. Sowohl die Vergleichbarkeit der einzelnen Datensätze als auch eine länderübergreifende Auswertung ist somit nur mit Einschränkungen möglich.

Ressourcenbedarf

Trotz der Verpflichtung Deutschlands, entsprechend der UNFCCC über anthropogene Quellen und Senken von Treibhausgasen sowie Änderungen von Kohlenstoffvorräten in Böden und in der Biomasse zu berichten und der Forderung des IPCC, nationale Daten für Hauptquellgruppen wie land- und forstwirtschaftlich genutzte Böden zu liefern, existiert bisher keine einheitliche gesetzliche Grundlage zur Erfassung von Kohlenstoff im Boden. Um die Datengrundlage im Bereich organischer Böden zu verbessern, wurde 2021 das durch das BMEL unterstützte Pilotprojekt MoMoK begonnen. Für die organischen Böden im Offenland ist das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz zuständig, während die Untersuchung der Waldstandorte vom Thünen-Institut für Waldökosysteme erfolgt. Erste Ergebnisse werden für das Jahr 2025 erwartet. Einen ähnlichen Stichprobenumfang wie die zuvor erfolgten Inventuren weist die im Jahr 2022 beginnende dritte BZE-Wald auf. Eine erste Wieder-



holungsinventur der BZE-LW findet ab 2023 statt. Somit ist zunächst die regelmäßige Erfassung der Kohlenstoffvorräte in den Böden Deutschlands gewährleistet, doch eine gesetzliche Regelung für eine kontinuierliche Inventarisierung fehlt bislang.

▲ Abb. 4.8-2: Die Vielfalt von Bodentypen spiegelt sich entsprechend ihrem Ausgangsgestein, der Oberflächenbeschaffenheit der Landschaft, dem Klima und Bewuchs in unterschiedlichen Eigenschaften und besonderen Funktionen wider. Böden sind somit ein guter Indikator für unsere Umwelt, denn sie speichern und filtern Stoffe, sie schützen das Trinkwasser und sind Standorte für Bäume, Pflanzen und Tiere. (Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme)

umweltbundesamt.de/publikationen/bodendaten-in-deutschland-0

thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/bodenzustandserhebung-landwirtschaft-bze-lw

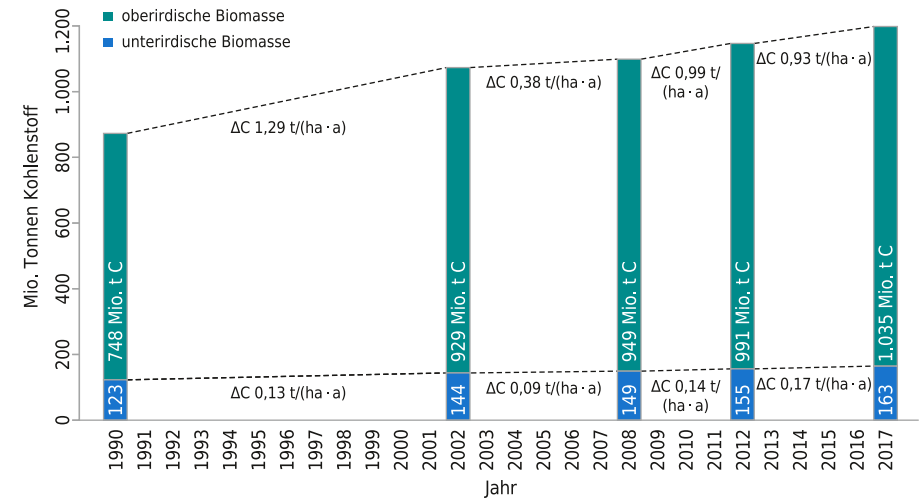
thuenen.de/de/fachinstitute/waldoekosysteme/arbeitsbereiche-neu/bodenschutz-und-waldzustand/bodenzustandserhebung

4.9 Oberirdische Biomasse im Wald

Wälder in Deutschland sind ein wichtiger Biomassespeicher. Bis zum Jahr 2017 sind die Vorräte in der lebenden Biomasse mit 227,4 Tonnen pro Hektar Wald auf einen neuen Rekord gestiegen. Oberirdisch wurden 86,3 % der Biomasse akkumuliert, weitere 13,7 % unterirdisch in Wurzeln. Wichtig ist jedoch nicht die bloße Speicherfunktion, sondern die CO₂-Senkenleistung. Zwischen 2012 und 2017 wurden pro Hektar und Jahr in der lebenden Biomasse 4,2 t CO₂ zusätzlich akkumuliert. Welchen Einfluss die Kalamitäten der letzten Jahre haben, wird die Bundeswaldinventur 2022 aufzeigen.



Entwicklung des C-Vorrates in der lebenden Biomasse



▲ Abb. 4.9-1: Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsveränderungen für die unterirdische und oberirdische Biomasse im Wald für die Jahre 1987/1993, 2002, 2008, 2012 und 2017 (Quelle: TI)

Klimatrends

Deutschland ist verpflichtet, im Rahmen internationaler Verträge jährlich einen Nationalen Inventarbericht (NIR) zum deutschen Treibhausgasinventar zu erstellen. Hierin wird die Entwicklung des Kohlenstoffspeichers »oberirdische Biomasse« jedes Jahr dokumentiert. Grundlage zur Schätzung der oberirdischen Biomasse im Wald sind die Daten der Bundeswaldinventur (BWI) und der zwischengeschalteten Kohlenstoffinventuren. Die Veränderungen zwischen den Inventurzeitpunkten geben die Entwicklung an.

Im Frühjahr 2021 starteten die Aufnahmen zur BWI 2022. Sie werden Ende des Jahres 2022 abgeschlossen sein.

Anschließend erfolgt eine Validierung der erfassten Daten und die Ableitung zusätzlicher Größen. Die Aggregation der Daten erfolgt nach unterschiedlichsten Klassifikationsmerkmalen und für unterschiedliche räumliche Aussageeinheiten. Mit der Ergebnisveröffentlichung ist 2024 zu rechnen.

Aus forstlichen Erhebungen und den Bundeswaldinventuren wissen wir, dass die Vorräte und damit auch die oberirdische Biomasse im Wald seit dem zweiten Weltkrieg in Deutschland kontinuierlich gestiegen sind. Sie befindet sich derzeit auf einem Rekordniveau von 2,07 Mrd. Tonnen. Der Kohlenstoffanteil beträgt 50 %.

◀ Foto 4.9-1 Inventurtrupp bei der Erfassung der Bundeswaldinventurdaten

Gesetzliche Grundlagen

Die Bundeswaldinventur ist die Grundlage für internationale Berichtspflichten, auch über den Klimabereich hinaus: Klimarahmenkonvention, Paris-Abkommen, Verordnung (EU) 2018/1999 Artikel 18, FAO Global Forest Resources Assessment, Biodiversitätskonvention (CBD). Sie liefert wichtige Informationen für die Politik und Wirtschaft sowie für die Wissenschaft. Die gesetzliche Grundlage bildet der § 41a des Bundeswaldgesetzes. Hierin sind sowohl die Ziele der Bundeswaldinventur als auch

die Arbeitsteilung zwischen Bund und Ländern geregelt. Auch die Kohlenstoffinventuren als Erhebungen zwischen zwei Bundeswaldinventuren in Alleinregie des Bundes sind dort rechtlich abgesichert, ebenso das Betretungsrecht der Inventurtrupps.

Die kompletten Daten der Bundeswaldinventur sind unter bwi.info frei zugänglich, mit Ausnahme der Koordinaten. Diese sind geschützt, um die Repräsentativität der Stichprobe zu wahren.

Messung in Deutschland

Die Bundeswaldinventur ist eine einphasige, stratifizierte Traktstichprobe. Das Grundnetz entspricht einem Quadratverband von 4 km × 4 km. Die Länder haben die Möglichkeit, dieses Grundnetz bei Bedarf auf 2,83 km × 2,83 km (doppelte Stichprobendichte) bzw. 2 km × 2 km (vierfache Stichprobendichte) zu verdichten, um die statistische Sicherheit der Inventurergebnisse auf regionaler Ebene zu erhöhen. An den Schnittpunkten des Gitternetzes sind quadratische Trakte mit einer Seitenlänge von 150 m × 150 m installiert. An den vier Traktecken – sofern sie im Wald liegen – erfolgen die

Aufnahmen. Die Traktecken sind permanent, aber unsichtbar im Boden vermarkert. So ist sichergestellt, dass die Aufnahmen immer an denselben Punkten stattfinden, was die statistische Sicherheit der Veränderungsergebnisse erhöht und spezielle Auswertungen zu Abgang und Zuwachs ermöglicht.

Über das gesamte Bundesgebiet hinweg ergeben sich somit rund 195.000 Traktecken, wovon etwa 75.000 im Wald liegen, terrestrisch aufgesucht und durch speziell geschulte Inventurtrupps erfasst werden.

Internationale Einbettung

Nahezu jedes Land der Europäischen Union führt eine Nationale Waldinventur auf Stichprobenbasis durch. Die Notwendigkeit für eine nationale, unabhängige Waldinventur ist in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in den einzelnen Staaten aus unterschiedlichen Beweggründen gewachsen. Daher sind solche Waldinventuren unterschiedlich aufgebaut und bestimmte Parameter uneinheitlich definiert. Um diese Unterschiede zu überwinden und für den europäischen Bedarf vergleichbare Ergebnisse zu liefern, haben sich die nationalen Institutionen, welche für die Durchführung der nationalen Inventuren verantwortlich sind, zum European National Forest Inventory Network zusammengeschlossen und treiben gemeinsam mit der Europäischen Union Projekte zur Harmonisierung der Inventurdaten voran.

Ressourcenbedarf

Die Bundeswaldinventur ist ein Gemeinschaftswerk von Bund und Ländern. Der Bund koordiniert die Erhebungen. Er ist für das Aufnahmeverfahren und die Schulungen verantwortlich und wertet die Inventurdaten aus. Die Länder sind für die Datenerhebung zuständig. Die Ergebnisse für Bund und Länder werden durch den Bund online für die Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

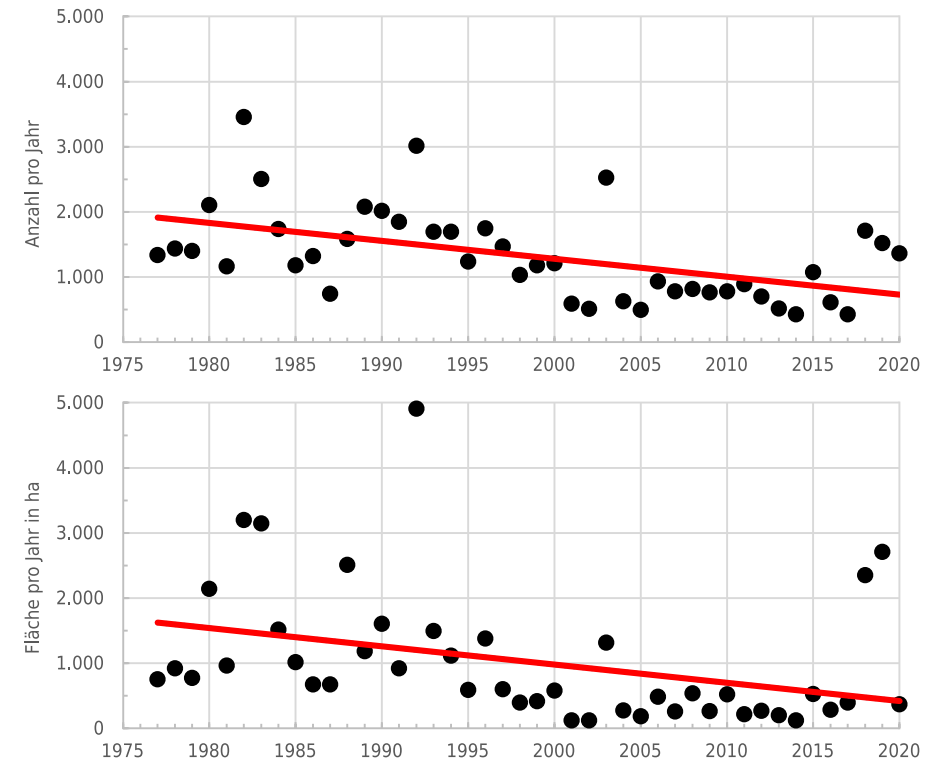
Die dritte Bundeswaldinventur 2012 kostete 21 Mio. Euro, wobei 6 Mio. Euro auf den Bund und 15 Mio. Euro auf die Länder entfielen.

4.10 Waldbrand

Deutschland ist vor allem in seinen östlichen, klimatisch kontinental getönten Kiefernwaldregionen von Waldbränden betroffen. Voraussetzung für ein Bodenfeuer ist ein relativ trockener Vegetationszustand, der als Folge niederschlagsfreier Witterungsabschnitte eintritt. Je trockener die Vegetation ist, desto leichter entzündet sich ein Brand und desto größer sind sowohl die Laufgeschwindigkeit des Feuers als auch die Freisetzung von Verbrennungswärme. Es ist zu erwarten, dass im Zuge des Klimawandels die Sommer-trockenheit und damit die Zündanfälligkeit der Bodendecke zunehmen werden.



Jährliche Anzahl und Fläche der Waldbrände in Deutschland 1977-2020



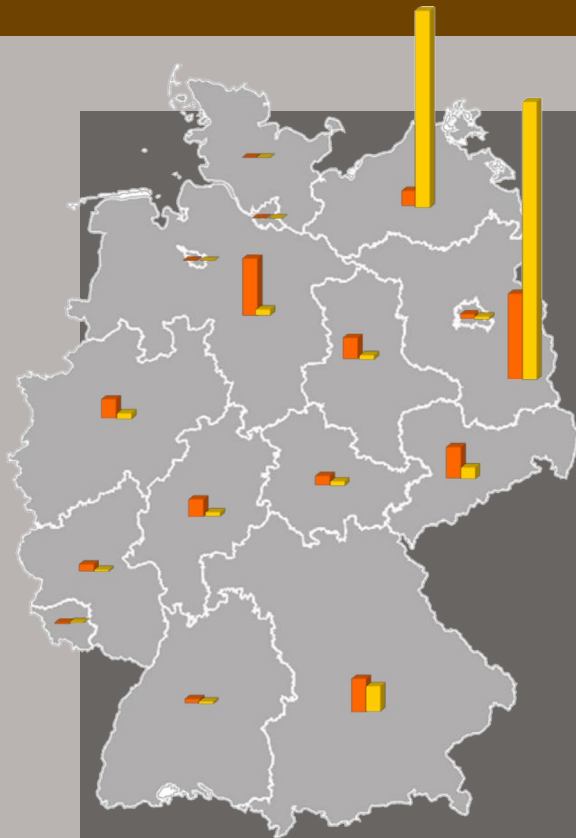
▲ Abb. 4.10-1: Jährliche Anzahl und Fläche der Waldbrände in Deutschland für den Zeitraum 1977-2020 gemäß Bundesstatistik (Quelle: BLE)

◀ Foto 4.10-1: Waldbrand bei Ossendorf am 20.07.2006; Inset: Kamera des FireWatch-Systems zur Waldbrandfrüherkennung

Klimasignale

Aus langen Reihen der Waldbrandanzahl und -fläche lassen sich, unter Einschränkung, die Zündempfindlichkeit der Vegetation, der Klimaeinfluss sowie die Reaktions- und Präventionsleistung (d. h. der Erfolg bzw. Misserfolg der Frühwarnung, der Feuererkennung und -bekämpfung) ablesen. Zu einer umfassenderen klimatologischen Interpretation sind zusätzlich lange Reihen von

Waldbrandindizes erforderlich, welche die witterungsbedingte Brennbarkeit der Waldbodenaufgabe ausdrücken. Die Indizes werden mithilfe von Waldbrandgefahrenmodellen berechnet, in die waldbrandrelevante meteorologische Parameter (Lufttemperatur und -feuchte, Wind, Niederschlag, Schneehöhe sowie kurz- und langwellige Strahlung) einfließen. Das



Waldbrände 2019

Anzahl 100
 0 Fläche in ha

▲ Abb. 4.10-2: Länderstatistik der Anzahl und Fläche in ha von Waldbränden in 2019 pro Bundesland (Quelle: BLE)

Messungen in Deutschland

Daten eines Waldbrandes, d. h. seines Ortes und seiner Fläche, der möglichen Ursache, der Alarmierungs- und Bekämpfungszeit, der betroffenen Bestandsart sowie des Schadensumfangs werden von den Feuerwehren und Forstbehörden der einzelnen Bundesländer erhoben und zu

monatlichen Übersichten zusammengefasst. Auszüge davon werden an die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) weitergereicht, welche eine bundesweite Jahresstatistik erstellt. Diese nationale Statistik liefert einen wertvollen Überblick über die bundesländerbezogene Verteilung des Waldbrandaufkommens und dient der strategischen Ausrichtung der Waldbrandprävention und -bekämpfung.

Eine besondere Bedeutung erlangte die jährliche Waldbranddokumentation nach den Jahrhundertbränden in Niedersachsen im August 1975. In deren Folge entwickelten sich die heutigen Melde- und Statistikstrukturen. Ein wesentlicher Fortschritt hinsichtlich der automatischen Erkennung und Meldung von Waldbränden wurde in den letzten Jahren durch den Aufbau des kameragestützten Fire-Watch-Systems erzielt. Der Einsatz moderner Infrastruktur zur Feuerdetektion und -bewältigung sowie die kontinuierliche Pflege und Verbesserung der Meldesysteme gehört zu den wichtigen Daueraufgaben der Daseinsvorsorge.

Die für die Prognose der Waldbrandgefahr erforderlichen meteorologischen Parameter werden durch Wetterstationen des DWD und von Partnermessnetzen erhoben. So gehen ca. 500 Wetterstationen in Deutschland in die Waldbrandprognose ein. Die erstellten Prognosen werden einmal täglich aktualisiert, wobei die Messreihen mit Daten aus der numerischen Wettervorhersage erweitert werden.

■ ■ ■

gehäufte Auftreten sehr hoher Waldbrandzahlen und -flächen kann Mängel in der technischen Ausstattung aufzeigen und Hinweise liefern auf erforderliche Umstrukturierungen in der Waldbrandbekämpfung, auf notwendige waldbauliche Maßnahmen und auf den Verbesserungsbedarf in den Frühwarnmodellen.

Internationale Einbettung

Nach Vorgaben des European Forest Fire Information System (EFFIS) werden Waldbranddaten aus jenen Regionen Deutschlands, die ein mittleres und hohes Waldbrandrisiko aufweisen, einmal im Jahr an das Joint Research Centre (Ispra, Italien) gemeldet. Diese Stabsstelle der EU-Kommission bereitet die Daten der Mitgliedsstaaten auf, unterzieht sie einer detaillierten Qualitätsanalyse und fasst sie zu einer europäischen Waldbrandstatistik zusammen. Auf der Grundlage von EFFIS erfolgt innerhalb der EU eine regionale Risikoklassifizierung sowie die Ausrichtung der Förderung des Waldschutzes. Ferner dienen die in EFFIS integrierten Daten der Modellvalidierung.

Unabhängig von EFFIS werden Beiträge über das Waldbrandaufkommen Deutschlands auf der Website des Global Fire Monitoring Center (GFMC, Freiburg, Deutschland) kommuniziert.

Gesetzliche Grundlagen

Nach Artikel 70 des Grundgesetzes sind in der föderal gegliederten Bundesrepublik die Bundesländer für Maßnahmen des Brand- und Katastrophenschutzes zuständig. Die Brandschutzgesetze der Bundesländer regeln die Abwehr von Gefahren durch Brände, während die jeweiligen Waldgesetze die Möglichkeit eröffnen, z. B. offenes Feuer und den Waldzutritt bei Brandgefahr zu verbieten. Brennverordnungen regeln die Beseitigung pflanzlicher Abfälle durch Feuer und das kontrollierte, präventive Brennen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) erstellt auf Grundlage bilateraler Verwaltungsvereinbarungen Prognosen der Waldbrandgefahr.

Ressourcenbedarf

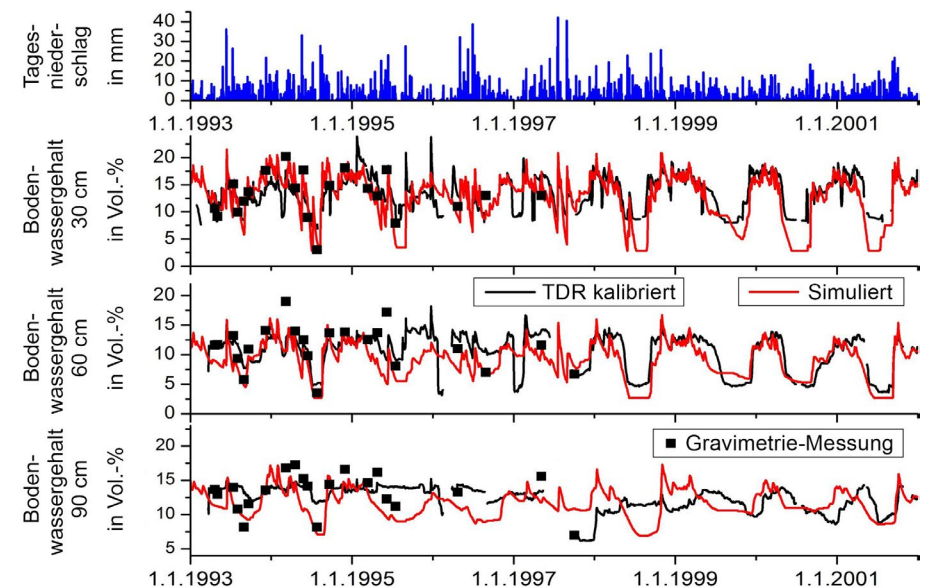
Die Erfassung von Waldbränden erfolgt in Deutschland durch die Forstdienststellen und Feuerwehren im Rahmen ihrer Tätigkeiten. Der Bund ist für die Zusammenstellung, Präsentation und Weiterleitung der Daten zuständig. Die Kosten tragen Bund und Länder. Der Ressourcenbedarf gilt gegenwärtig als gesichert. Die Kosten für die meteorologische Prognose der Waldbrandgefahr trägt der DWD.

4.11 Bodenfeuchte

Flächendeckende Informationen über die Bodenfeuchte mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung sind für viele Bereiche der Agrar- und Forstmeteorologie und der Hydrologie essentiell und für die Niederschlagsvorhersage eine wichtige Anfangsbedingung in den Modellierungen. Kenntnisse über die aktuelle und zukünftige Bodenwasserverfügbarkeit auf Agrar- und Forstflächen in Abhängigkeit von Bodenart und Bewuchs sind eine wesentliche Grundlage für die Planung aktueller und zukünftiger Bewirtschaftungsmaßnahmen. Auch für die Hochwasservorhersage sind Kenntnisse der aktuellen Bodenfeuchte und damit der Wasseraufnahmefähigkeit der Böden unabdingbar, wie die Flutkatastrophe im Juli 2021 gezeigt hat.



Tageswerte von Niederschlag sowie simulierten und gemessenen Bodenfeuchten am Versuchsfeld Müncheberg 1993-2001



▲ Abb. 4.11-1: Tageswerte des Niederschlages, simulierte und mit TDR und Gravimetrie gemessene Bodenfeuchten in Volumenprozent für 0-30 cm (= 30 cm), 30-60 cm (= 60 cm) und 60-90 cm (= 90 cm) Tiefe im Zeitraum 01.01.1993-31.12.2001 am Versuchsfeld Müncheberg, Höhe: 62 m N.N., geographische Koordinaten: 52° 15' N und 14° 07' E (Quelle: ZALF)

Klimasignale

Kontinuierliche Messungen der Bodenfeuchte durch automatisch registrierende Messsysteme sind seit 1991 möglich. Die Bandbreite reicht hier von Time-Domain-Reflectometry(TDR)-sowie Frequency-Domain-Reflectometry(FDR)-Sensoren für lokale Profilmessungen und der Vernetzung dieser Sensoren über drahtlose Netzwerke zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Bodenwasserspeicherung (Vereecken et al. 2015) bis hin zu Anwendungen wie Cosmic-Ray-Neutronensonden (CRNS), die integrale, zeitlich hoch aufgelöste Messungen von

Flächenmittelwerten der oberflächennahen Bodenfeuchte mit einem Radius von 150-250 m ermöglichen können (Nguyen et al. 2019). Eine Zusammenfassung des aktuellen Standes dieser Messtechnik ist z. B. in Babaeian et al. (2019) und Nasta et al. (2020) zu finden. Durchgehende Messreihen der Bodenfeuchte sind wichtig für die Weiterentwicklung und Prüfung von Bodenwasserhaushaltsmodellen (Wegehenkel et al. 2019) oder für den Test des Erdbodenmoduls des DWD-Wettervorhersagemodells COSMO-DE (Abb. 4.11-1).

Messungen in Deutschland

Messungen und Modellrechnungen zur raumzeitlichen Dynamik der Bodenfeuchte werden nicht nur vom Deutschen Wetterdienst (DWD), sondern auch von Landeseinrichtungen auf Dauerbeobachtungsflächen (BDF-II) auf Agrar- und Forstflächen durchgeführt. Daneben führen universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen in Projekten wie TERENO (Link siehe unten) Messungen und Modellrechnungen zur Bodenfeuchte auf verschiedenen räumlichen Skalen wie Versuchsfeldern und Einzugsgebieten durch. Kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen sind trotz automatisch registrierender Messsysteme arbeitsaufwändig und kostenintensiv, da diese Systeme häufig kalibriert und überprüft werden müssen (Bogena et al. 2017, Montzka et al. 2017). Im Bereich des DWD werden regelmäßige Messungen zur Bodenfeuchte unter verschiedenen Pflanzenbeständen und mit verschiedenen Techniken seit mehreren Jahrzehnten an den agrarmeteorologischen Messfeldern in Braunschweig und

Weihenstephan-Dürnast sowie zusätzlich seit 1998 auf dem Intensiv-Messfeld Falkenberg des DWD-Observatoriums Lindenberg durchgeführt (Beyrich et al. 2006). Der DWD berechnet über das ganze Jahr hinweg täglich die Bodenfeuchte in 10-cm-Schichten bis in 2 m Tiefe für verschiedene Kulturen und Böden auf einem 1 × 1-km-Raster mit dem am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig ZAMF/DWD entwickelten Modell AMBAV und stellt diese Daten im Bodenfeuchteviewer auf der DWD-Homepage dar. Eine flächendeckende direkte Bestimmung der oberflächennahen Bodenfeuchte mit hoher räumlicher (30 × 30 m) und zeitlicher Auflösung durch Radarsatelliten wie z. B. ENVISAT war bisher nicht oder nur mit starken Einschränkungen

möglich (Koyama et al. 2010). Im Gegensatz dazu ergab die bisherige Auswertung von Daten der Sentinel-1-Satelliten mit einem bis zu 5 Meter hochauflösenden C-Band-Radarinstrument mit synthetischer Apertur (SAR) deutlich bessere Ergebnisse (Benninga et al. 2020). Für gröbere räumliche Auflösungen (10 × 10 km) sind direkt erfasste Bodenfeuchten inzwischen von Satellitenplattformen wie Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) verfügbar. Weiteres dazu findet man bei der European Space Agency (ESA, siehe Link unten). Im Bereich der numerischen Wettervorhersage werden Flächendaten zur regionalen Bodenfeuchte aus Modellrechnungen unter Nutzung der gemessenen Landoberflächentemperatur berechnet.

Gesetzliche Grundlagen

Für den DWD sind diese im Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (DWDG) verankert. Für land- und forstwirtschaftliche Dauerbeobachtungsflächen mit Bodenfeuchtemessungen sind neben den Gesetzen zum Bodenschutz auch EU-Verordnungen maßgebend.

Internationale Einbettung

Die internationale Einbettung zur flächendeckenden Bestimmung der Bodenfeuchte mittels Satelliten ist im Bereich des H SAF (Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management) von EUMETSAT gegeben. Messreihen und Daten von Versuchsfeldern und Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland und benachbarten Ländern werden zunehmend in Datenzentren wie dem BonaRes-Datenzentrum erfasst (Link siehe unten). Das von der TU Wien aufgebaute International Soil Moisture Network (ISMN) fasst auch viele In-situ-Daten zur Bodenfeuchte zusammen und wird mittlerweile von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gepflegt und verwaltet. Über COSMOS-Europe sind darüber hinaus die In-situ-Messungen mit der CRNS-Methode europaweit vernetzt (Bogena et al. 2022). Weitere Informationen zur Bodenfeuchte als Klimavariablen bietet die GCOS-Webseite (Link siehe unten).

Ressourcenbedarf

Bei Messungen und Auswertungen im Bereich der Bodenfeuchte ist der materielle und personelle Ressourcenbedarf hoch.

www.bonares.de/datacentre-de climate.esa.int/en/odp/#/project/soil-moisture

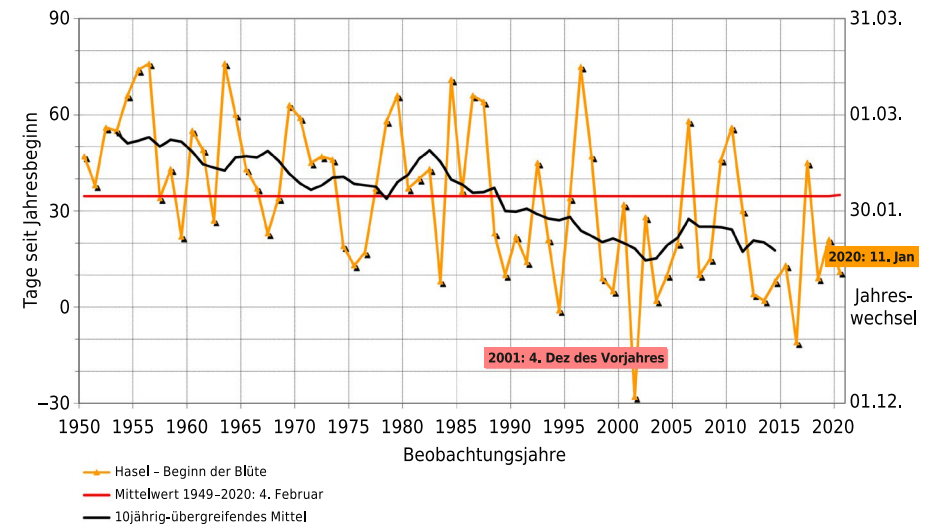
tereno.net gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/soil-moisture www.zalf.de

4.12 Phänologie

Die Phänologie befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen. Es werden die Eintrittszeiten charakteristischer Vegetationsstadien (Phasen) beobachtet und festgehalten. Sie stehen in enger Beziehung zu Witterung und Klima und sind daher wichtige Indikatoren für den Nachweis von Folgen der Klimaänderungen in der Biosphäre.



Beginn der Haselblüte in Geisenheim seit 1950



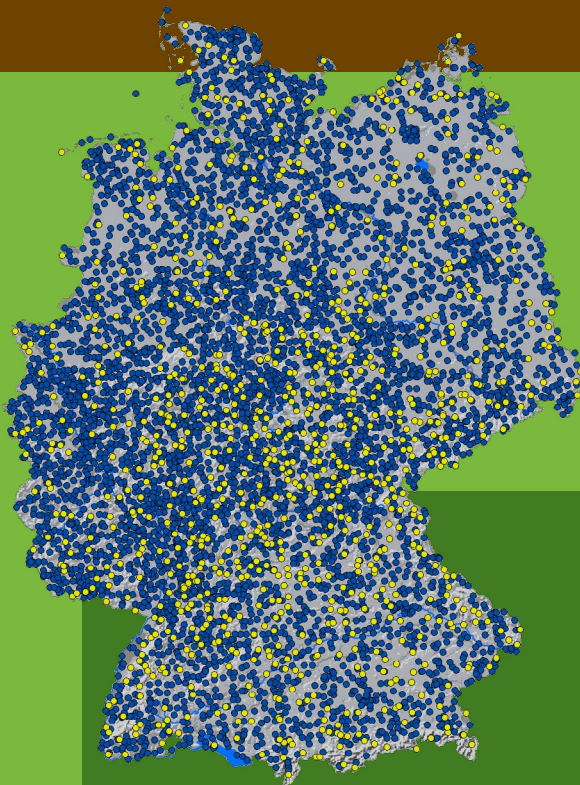
▲ Abb. 4.12-1: Zeitlicher Verlauf des Beginns der Haselblüte in Geisenheim seit 1950 (Quelle: DWD)

Klimasignale

Von den Stationen in der phänologischen Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (DWD) decken 474 einen Zeitraum von mehr als 50 Beobachtungsjahren ab, 164 davon einen Zeitraum von mehr als 60 Jahren (innerhalb der Periode 1951–2020). Allerdings bedeutet dies nicht, dass auch alle Phasen durchgehend beobachtet wurden. Anhand von historischen Aufzeichnungen war es teilweise möglich, Datensätze vor 1951 zu ergänzen. Von der Station Geisenheim am Rhein liegen einige phänologische Beobachtungen zurückreichend bis 1896 vor. Sie zeigen in den letzten 60 Jahren eine deutliche Verschiebung des Blühbeginns hin zu früheren Terminen.

Gesetzliche Grundlagen

Nach dem Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (§ 4 Abs. 1) ist der DWD neben dem Betrieb von Beobachtungssystemen zur Erfassung meteorologischer Prozesse auch für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und anderen Bereichen der Umwelt zuständig.



▲ Abb. 4.12-2: Phänologisches Messnetz des DWD. Dunkelblaue Symbole sind Stationen mit mindestens einem Beobachtungsjahr, gelbe Symbole mit 50 oder mehr Beobachtungsjahren. (Quelle: DWD)

Messungen in Deutschland

Bereits 1781–1792 wurden durch die Societas Meteorologica Palatina systematisch phänologische Beobachtungen durchgeführt. Doch der eigentliche Durchbruch der Phänologie erfolgte im Jahr 1882 und geht zurück auf die Initiative des deutschen Universitätsprofessors Hermann Hoffmann. Hoffmann und seine Arbeitsgruppe erarbeiteten und publizierten Anleitungen für die Beobachtung phänologischer Phasen und schufen so die Grundlage für einheitliche

Zusammenarbeit in Europa

Deutschland ist sowohl am Europäischen Phänologischen Messnetz (EPN) als auch mit 32 Gärten am Beobachtungsprogramm der Internationalen Phänologischen Gärten (IPG) beteiligt. Deren Messnetzverwaltung hat Anfang 1996 die Humboldt-Universität in Berlin vom Deutschen Wetterdienst

Beobachtungen nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen europäischen Ländern. Neben diesem europäischen Messnetz entwickelten sich in Deutschland auch einige regionale Messnetze.

Das erste dauerhafte deutschlandweite phänologische Beobachtungsnetz wurde von der Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft 1922 gegründet und bis 1935 betreut. 1936 wurde das Messnetz vom Reichswetterdienst übernommen und von Dr. Fritz Schnelle weiter ausgebaut.

1946 wurden die phänologischen Beobachtungen von den Wetterdiensten der US- und der Sowjetischen Zone wiederaufgenommen. Diese Messnetze wurden vom Meteorologischen Dienst (MD; gegründet 1950) der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik und dem Deutschen Wetterdienst (DWD; gegründet 1952) weiter betreut. Beide Messnetze und die zugehörigen Datenarchive wurden 1990 wieder zusammengeführt.

übernommen. Im Jahr 2003 war der Deutsche Wetterdienst maßgeblich beteiligt an der Initiierung der COST-Aktion-725. Hauptaufgabe war es, einen phänologischen Referenzdatensatz mit europaweiten Beobachtungen zusammenzustellen. Auch am Nachfolgeprojekt Pan European Phenological database (PEP725), das vom

Damit verfügt der Deutsche Wetterdienst über ein umfassendes Archiv phänologischer Daten. Neben den jährlichen Beobachtungen werden auch Sofortmelderdaten – sofort nach Auftreten der zu beobachtenden phänologischen Phase wird der Termin gemeldet – in der Datenbank gespeichert. Diese Daten, die über die aktuelle Vegetationsentwicklung informieren, werden hauptsächlich für die Pollenflugvorhersage und die Beratung von Landwirten genutzt.

Die jährlichen Beobachtungen, die für die Klimaforschung genutzt werden, sind von 1951 bis heute in der Datenbank des DWD gespeichert. Aktuell sind 1.120 phänologische Beobachter tätig. Ihr Beobachtungsprogramm umfasst ca. 160 Phasen an wildwachsenden Pflanzen, landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, Obstbäumen und -sträuchern sowie Weinreben (Kaspar et al. 2014).

österreichischen Wetterdienst ZAMG, dem damaligen österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung und dem Netz der europäischen Wetterdienste EUMETNET ins Leben gerufen wurde, ist der Deutsche Wetterdienst beteiligt. Das Hauptziel von PEP725 ist die Förderung und Unterstützung phänologischer Forschung durch die Bereitstellung einer jährlich aktualisierten paneuropäischen phänologischen Datenbank mit einem offenen, uneingeschränkten Datenzugriff für Wissenschaft, Forschung und Ausbildung (Templ et al. 2018).

Ressourcenbedarf

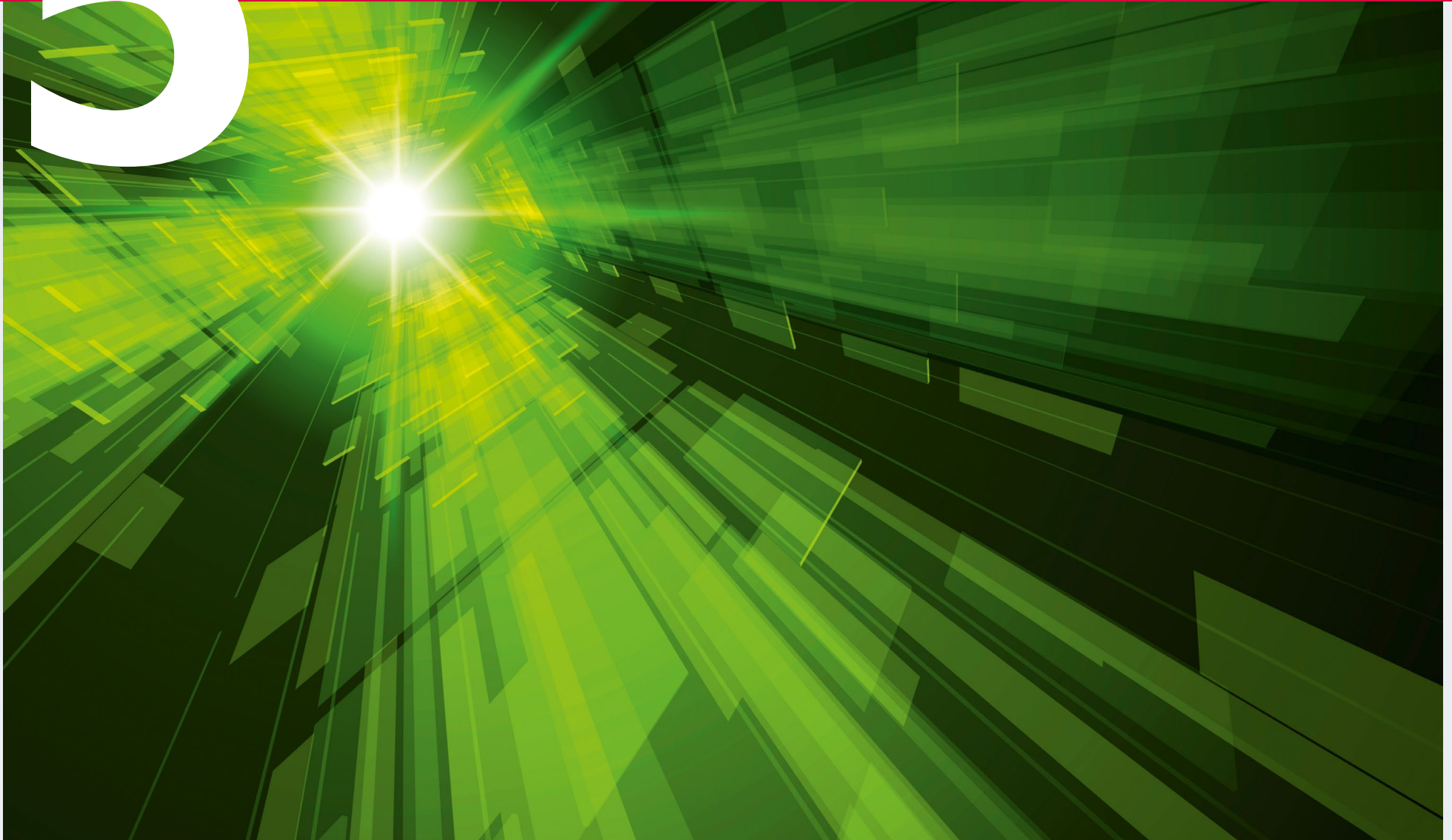
Das phänologische Beobachtungsnetz stützt sich überwiegend auf freiwillige Beobachter. Während der letzten Jahrzehnte ist deren Zahl kontinuierlich zurückgegangen, auf derzeit ca. 1.120 ehrenamtliche Beobachter. Um weiterhin von der generell vorhandenen Bereitschaft zur ehrenamtlichen Mitarbeit profitieren zu können, sind geeignete Werbemaßnahmen erforderlich. Auch das Beobachtungsnetz der IPG arbeitet auf ehrenamtlicher Basis.

dwd.de/phaenologie

opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/phenology

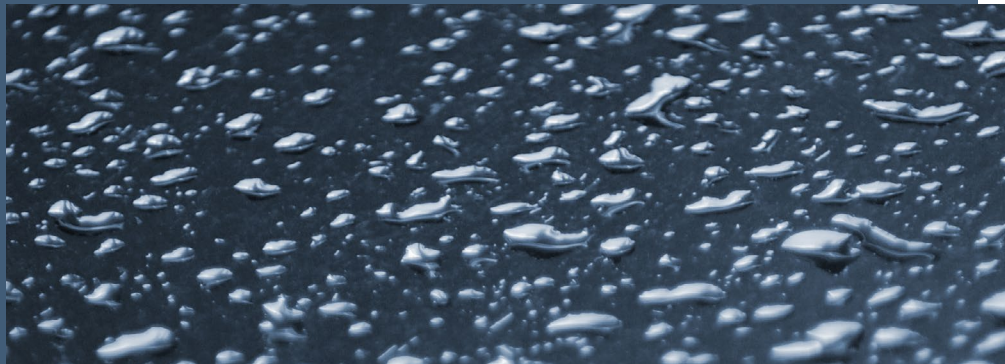
5

Internationale Datenzentren

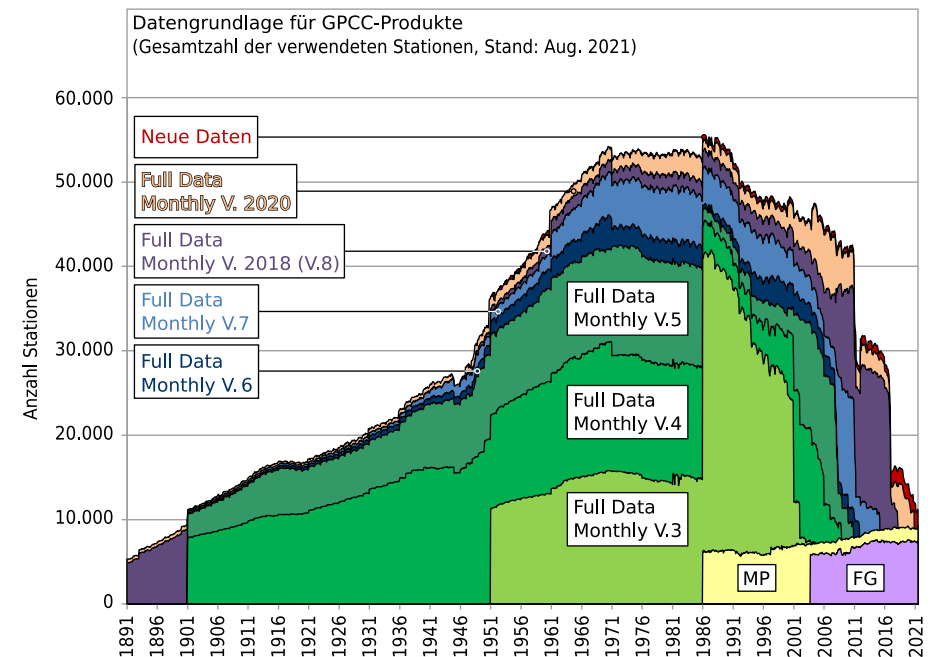


5.1 Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie

Mit seinem weltweit größten Archiv qualitätsgesicherter monatlicher In-situ-Niederschlagsbeobachtungen besitzt das vom DWD betriebene Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN, engl. Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) eine einmalige und weltweit anerkannte Kompetenz im Bereich der globalen Analyse und Überwachung des Landoberflächenniederschlags. Im Hinblick auf unterschiedliche Kundenanforderungen stellt das GPCC verschiedene Analyseprodukte (z. B. Full Data Monthly V.2020 seit 1891) bereit. Das GPCC erweiterte 2012 die Verarbeitung monatlicher Daten um tägliche Niederschlagsdaten und bietet seitdem auch tägliche Niederschlagsanalysen an (z. B. Full Data Daily seit 1982). Die GPCC-Niederschlagsprodukte sind im Internet frei verfügbar und Referenz für ein weites Spektrum hydroklimatologischer Anwendungen.



Datenbelegung der verschiedenen GPCC-Produkte über die letzten 130 Jahre



▲ Abb. 5.1-1: Farbig markiert sind die regelmäßig ausgegebenen Produkte First Guess (FG) und Monitoring Product (MP) sowie die wachsende Belegung der Full-Data-Monthly-Analysen im Verlauf der Versionen 3 bis 8 und V.2020 in den Jahren 2005, 2008, 2010, 2011, 2015, 2018 und 2020. (Quelle: DWD)

Bedeutung für GCOS

Aufgrund der Bedeutung einer verlässlichen Diagnose des globalen Niederschlags für das quantitative Verständnis des globalen Wasserhaushaltes ist auf Anregung der die WMO beratenden technischen Kommissionen das Projekt GPCP (Global Precipitation Climatology Project) als Beitrag zum Projekt Global Energy and Water Exchanges (GEWEX) des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) aufgesetzt worden. Aufgrund

der durch Mehrdeutigkeiten im beobachteten Signal erschwerten Fernerkundung von Niederschlag über Landoberflächen mittels Satelliten kommt dem GPCC die Rolle der Generierung eines monatlichen gerasterten Niederschlagsüberwachungsproduktes auf Basis der im GTS verfügbaren In-situ-Niederschlagsbeobachtungen zu. Die im WMO TD-Nr. 367 festgehaltenen Anforderungen wurden vom WZN ■■■



so gut erfüllt, dass die WMO den DWD gebeten hat, das GPCC als eine dauerhafte Komponente des im Jahr 1992 gegründeten Global Climate Observing System (GCOS) einzurichten. Dabei ist das GPCC auch Partnerzentrum für das Global Terrestrial Network for Hydro-

logy (GTN-H) innerhalb von GCOS/GTOS und ist gleichzeitig aufgrund seiner Auswertungen der über das GTS eingesammelten CLIMAT-Meldungen für den Parameter Niederschlag das deutsche GCOS Surface Network (GSN) Monitoring Centre.

Internationale Einbettung

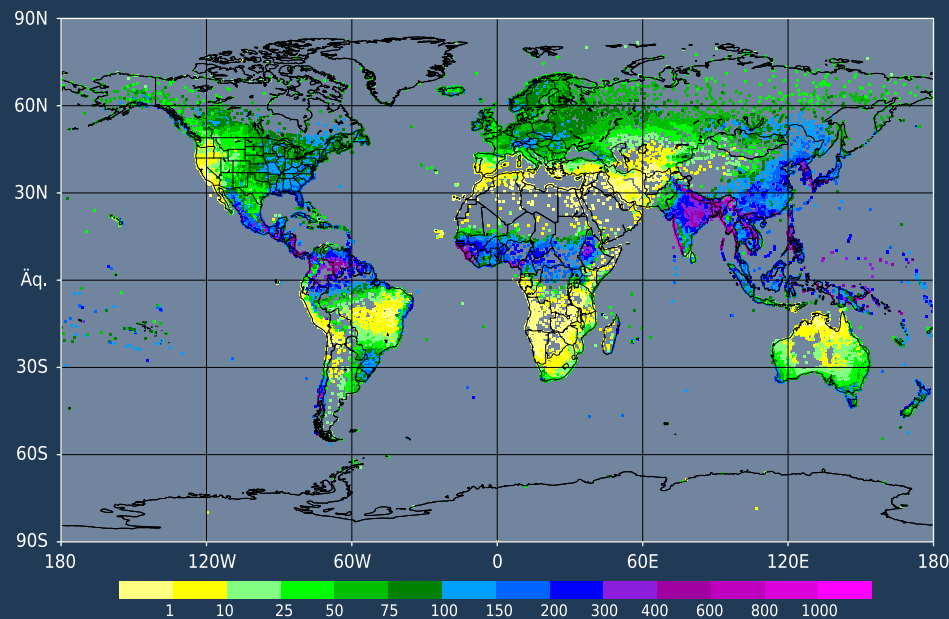
Das GPCC betreibt globale Klimaüberwachung für die atmosphärische Essential Climate Variable (ECV) Niederschlag. Das GPCC trägt zu GCOS und dem durch WMO, UNESCO, ISC, UNEP und der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) getragenen Global Terrestrial Observing System (GTOS) bei. Mit seinem monatlichen Monitoring-Produkt ist das GPCC langjähriger Partner im vorbenannten GEWEX-Projekt des WCRP und als verlässlicher Lieferant von stationsbasierten Referenzniederschlagsprodukten essentieller Partner der International Precipitation Working Group (IPWG), einer gemeinsamen Arbeitsgruppe der WMO und der Coordination Group for Meteorological Satellites (CGMS). Letz-

tere ist eine vor 40 Jahren gegründete Vereinigung der satellitenbetreibenden Agenturen zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Messungen der unterschiedlichen Systeme im Orbit. Das vorläufige sogenannte First-Guess-Produkt des WZN wird von der FAO zur Dürrewarnung verwendet. Die globalen Full-Data-Produkte bedienen die Agenten vom UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme (IHP) und dem WMO Hydrology and Water Resources Programme (HWRP), der homogenisierte Datensatz VASclimO V1.1 und sein Nachfolger HOMPRO die Klimaforschung (CLIVAR, IPCC) im Bereich der globalen Niederschlagstrendanalyse rezenter Dekaden.

Ressourcenbedarf

Der kontinuierliche Betrieb des GPCC beim DWD seit 1989 demonstriert die Nachhaltigkeit dieses Engagements. Zurzeit sind keine Änderungen des Status quo absehbar.

Globale Messungen



Mittlere Niederschlagswerte (GPCC) mit räumlicher Verteilung für JULI nach Neuberechnung im Herbst 2020

@ GPCC 10. 12. 2020, Anzahl der Messstationen: 84.917

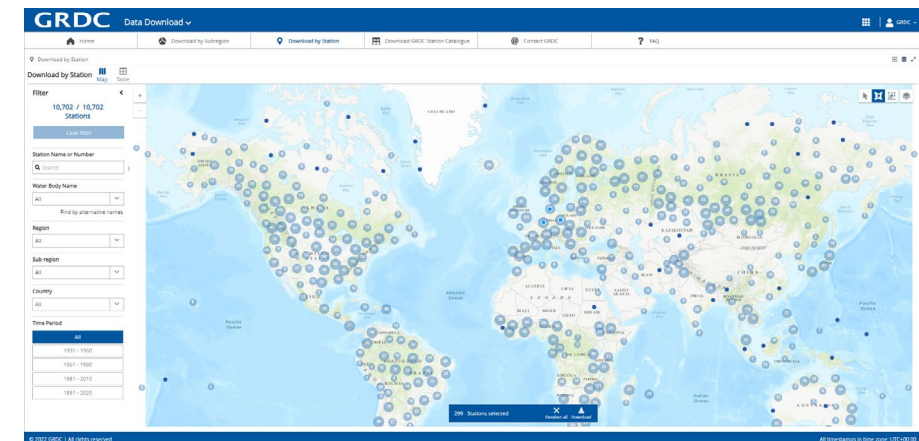
▲ Abb. 5.1-2: Räumliche Verteilung des mittleren Niederschlags (1951–2000) im Raster aus dem Full-Data-Monthly-V.2020-Datensatz mit 84.917 Stationen für den Monat Juli (Quelle: GPCC)

5.2 Global Runoff Data Centre

Das Global Runoff Data Centre (GRDC) archiviert Abflussdaten mit mittleren Tages- und Monatswerten von derzeit mehr als 10.000 Stationen weltweit. Diese Daten werden zur Unterstützung der klimabezogenen Programme und Projekte der Vereinten Nationen und der internationalen Forschung auf den Gebieten des Klimawandels und der grenzüberschreitenden Wasserwirtschaft vorgehalten.



Aktuelle Verfügbarkeit historischer Abflussdaten in der Datenbank des GRDC



▲ Abb. 5.2-1: Das GRDC-Datenportal dient zur Bereitstellung der GRDC-Abflussdaten in unterschiedlichen Formaten. (Quelle: BfG)

Bedeutung für GCOS

Der Süßwassereintrag in die Weltmeere kann die globale thermohaline Zirkulation beeinflussen. Somit kommt dem Abfluss eine wichtige Rolle als Treiber der Klimasysteme zu. Veränderungen des Niederschlags und der Evapotranspiration sowie sich ändernde Landnutzung widerspiegeln sich in den Abflussmengen, weshalb deren statistische Eigenschaften als Indikatoren für Klimaschwankungen und -änderungen herangezogen werden können. Abflussdaten sind zur Kalibrierung und Validierung globaler Klimamodelle sowie für Trendanalysen und sozioökonomische

Studien erforderlich. Während zur Berechnung des Süßwassereintrags in die Weltmeere Monatswerte ausreichen, bedarf es für die statistische Analyse der Abflussmengen und der Beurteilung von Extremereignissen in der Regel Tageswerte. Das GRDC hat ein Netzwerk bestehend aus Abflussmessstationen am Unterlauf der größten Flüsse der Welt entworfen. Dieser Entwurf, bekannt als Global Terrestrial Network for River Discharge (GTN-R), dient jetzt GCOS und GTOS als Basisnetzwerk.

Internationale Einbettung

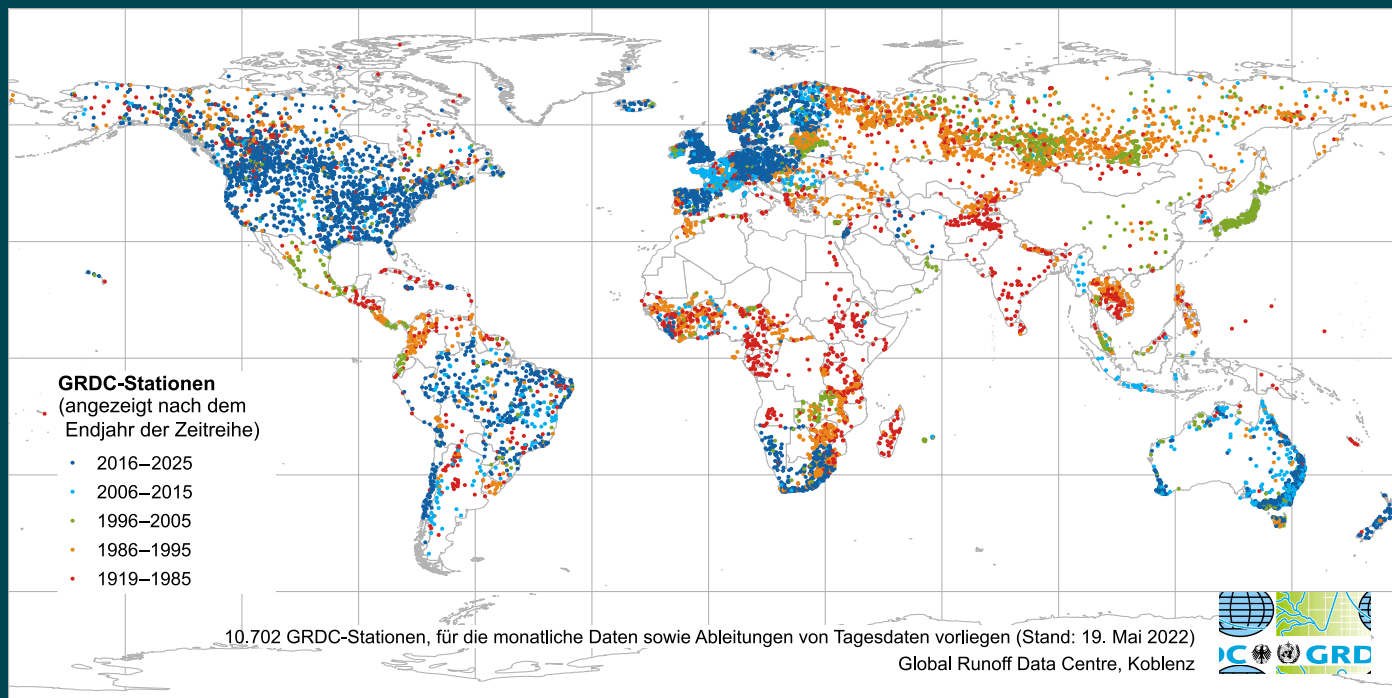
Das GRDC arbeitet unter der Schirmherrschaft der WMO. Es wurde 1988 in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) eingerichtet. Das GRDC ist ein Beitrag der Bundesrepublik Deutschland zum Weltklimaprogramm der WMO (WCP) und zur UNESCO. Es wird durch

einen internationalen Lenkungsausschuss bestehend aus Vertretern von WMO, UNESCO, UNEP, IAHS und Partnerdatenzentren in der grundsätzlichen Ausrichtung seiner Tätigkeiten beraten. Basierend auf den Resolutionen 21 (WMO Congress XII, 1995) und

25 (WMO Congress XIII, 1999) akquiriert das GRDC global kostenfreie Abflussdaten in enger Partnerschaft mit den Nationalen Hydrologischen Diensten. Die nachhaltige Sammlung von Abflussdaten und zugehörigen Stationsmetadaten wurde von den Mitgliedsstaaten der WMO auf ihrem

18. WMO-Kongress (Cg-18) als besonders wertvoll gewürdigt und die Abflussdaten des GRDC als einer der ersten Datensätze in den WMO-Klimadatenkatalog aufgenommen. Mit den Abflussdaten kann das GRDC internationale Forschungsprogramme wie das Global Energy and Water Exchanges Project (GEWEX) und das Climate and Cryosphere Project (CliC) des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) der WMO unterstützen. Das GRDC ist mit seinem Beitrag zu GTN-H auch mit dem Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) verbunden.

Globale Messungen



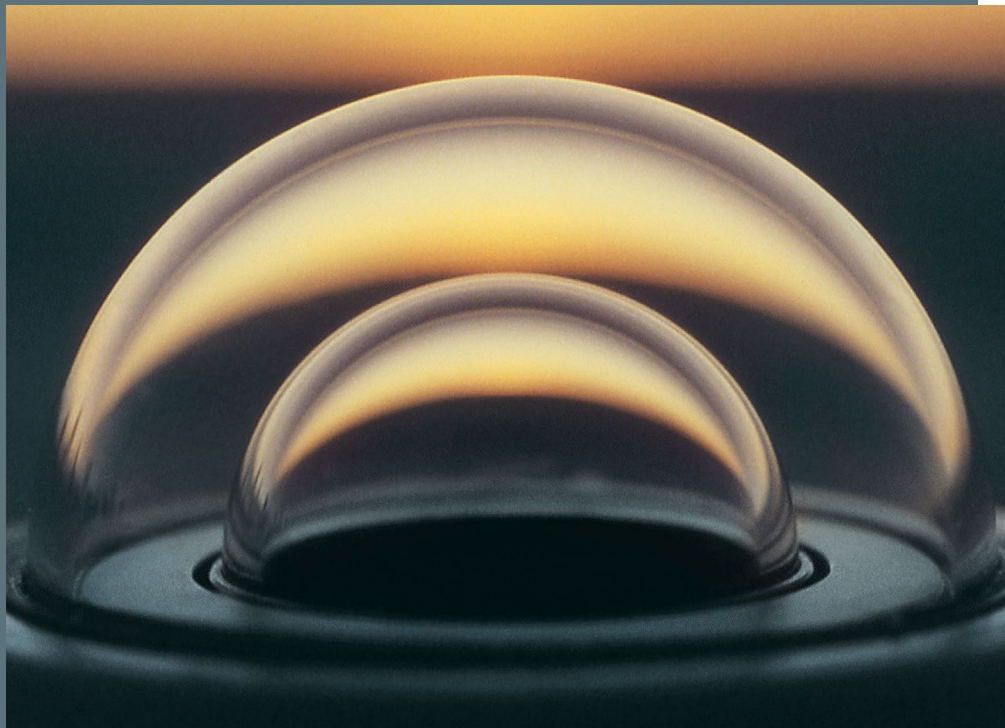
▲ Abb. 5.2-2: Mit 10.702 Abflussstationen aus 159 Ländern verfügt das GRDC über das umfassendste globale Abflussdatenarchiv (Stand: 19. Mai 2022). Die weltweite Bereitstellung der Daten erfolgt über das GRDC-Datenportal unter portal.grdc.bafg.de. (Quelle: BfG)

Ressourcenbedarf

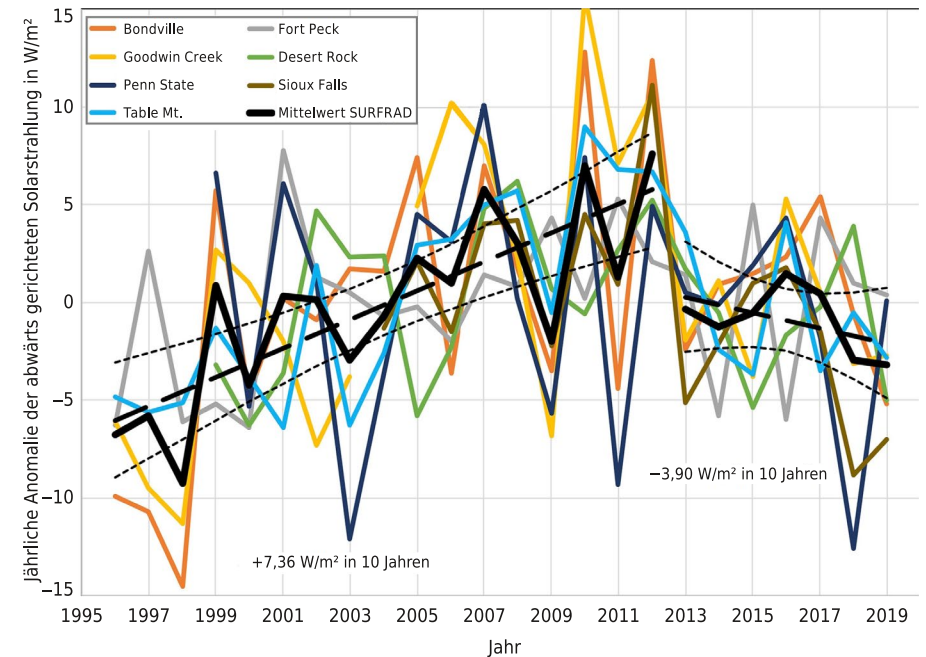
Der Betrieb des GRDC ist Teil des Aufgabenbereichs der BfG. Somit ist die Finanzierung der GRDC-Kernfunktionen gewährleistet. Eine erweiterte Datenakquise und die Weiterentwicklung des GTN-R-Referenznetzwerks erfordern zusätzliche Mittel. Mit ihnen könnte das volle Potenzial des GRDC und seine Bedeutung für die Forschung im Bereich Klimavariabilität und globaler Wandel weiter entfaltet werden.

5.3 World Radiation Monitoring Center

Das World Radiation Monitoring Center (WRMC) ist das zentrale Archiv des Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Das BSRN hat das Ziel, qualitativ höchstwertige kurz- und langwellige Bodenstrahlungsflüsse in 1-min-Auflösung für die Forschungsprogramme des »World Climate Research«-Programms sowie für weitere wissenschaftliche Projekte bereitzustellen.



Anomalie der kurzwelligen Abwärtsstrahlung



▲ Abb. 5.3-1: Zeitreihe zur Anomalie der kurzwelligen Abwärtsstrahlung bezogen auf das Mittel von 1996 bis 2019 für das SURFRAD-Netzwerk der US-amerikanischen BSRN-Stationen ((Quelle: DWD nach Augustine und Hodges 2021))

◀ Foto 5.3-1: Dom eines Pyranometers

Bedeutung für GCOS

Im Jahr 2004 wurde das BSRN/WRMC als das »global baseline network for surface radiation« des Global Climate Observing System (GCOS) ernannt. Die qualitativ hochwertigen, einheitlichen und konsistenten Messungen des gesamten BSRN-Netzwerkes werden verwendet um:

- die kurz- und langwelligen Strahlungskomponenten und deren Änderungen mit den momentan besten zur Verfügung stehenden Methoden zu erfassen,

- auf Satellitenmessungen basierende Abschätzungen von bodennahen Strahlungsflüssen zu überprüfen und zu bewerten sowie
- die Ergebnisse von globalen Klimamodellen (GCMs) zu verifizieren.

Im Jahr 1992 begann das BSRN/WRMC mit 9 Stationen. Aktuell (Mai 2021) bietet das Archiv mehr als 12.200 Stationsmonate an Daten von 74 Stationen (58 aktiv, 16 geschlossen) rund um die Welt (Link am Ende des Beitrags). ■ ■ ■

■ ■ ■
 Obwohl das WRMC ursprünglich für die speziellen Bedürfnisse von Klimaforschern konzipiert wurde, wird es zunehmend auch für die Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien verwendet.

Internationale Einbettung

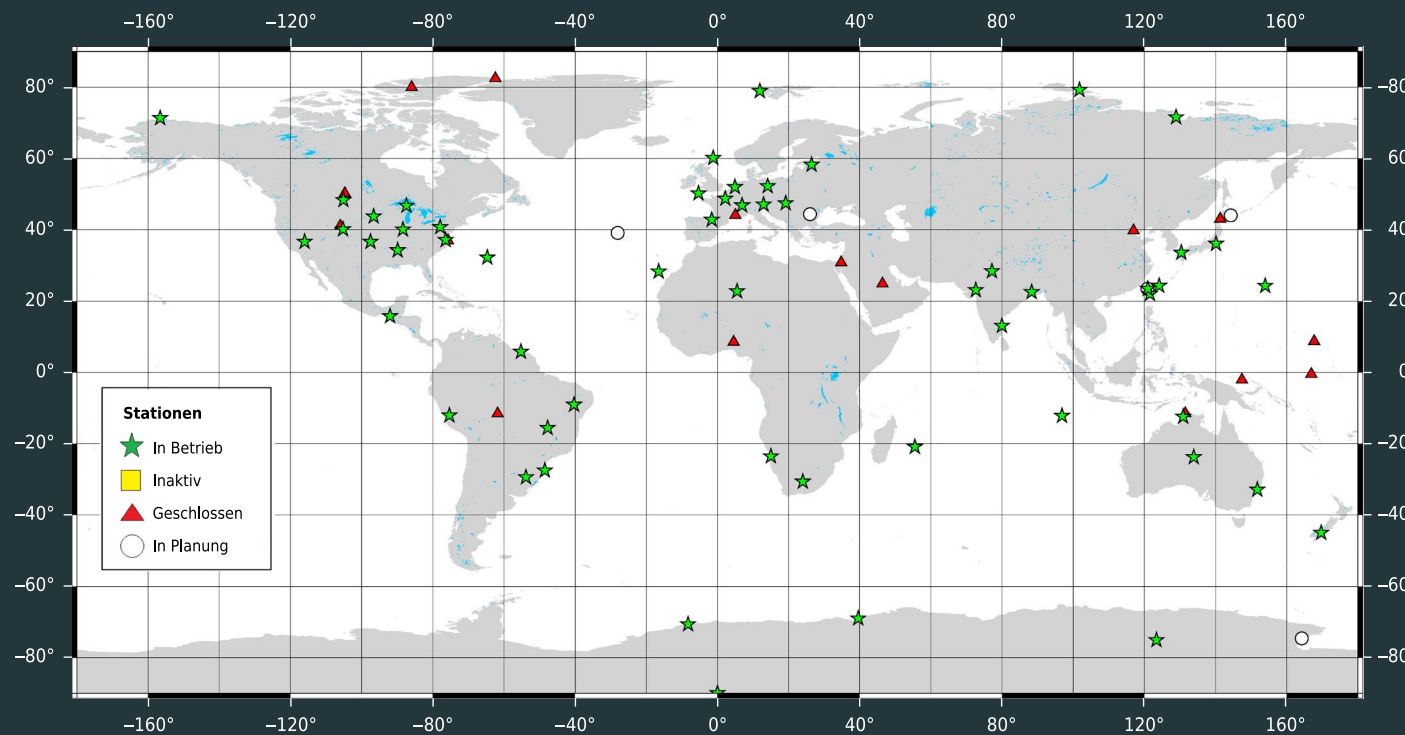
Das BSRN/WRMC wurde vom World Climate Research Programme ins Leben gerufen und trägt zu den Aktivitäten bei der Bewertung von Klimamodellen bei, die im Rahmen des Projekts Global Energy and Water Exchanges (GEWEX) durchgeführt werden. Es ist dem GEWEX Data and Analysis Panel (GDAP) ange-

gliedert sowie Teil des GCOS-Netzwerks. Im Jahr 2022 erneuerte das BSRN sein Engagement bei den Aktivitäten des Global Climate Observing System und wurde als von GCOS anerkanntes Netzwerk für globale Messungen der Oberflächenstrahlung benannt. Bereits im Jahr 2011 wurde zwischen dem BSRN/WRMC und dem Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC, Link siehe unten) eine formale Netzwerk-Kooperation vereinbart. Die alle zwei Jahre durchgeführten BSRN-Tagungen dienen der engen Kooperation zwischen den BSRN-Stationswissenschaftlern sowie den Nutzern der BSRN-Daten.

Ressourcenbedarf

Für einen effektiven Betrieb des WRMC am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven (AWI) wäre nicht nur eine Datenkurator-Stelle, sondern auch eine wissenschaftliche Stelle nötig. Zusätzlich benötigt der Betrieb die technische Unterstützung vom AWI-Rechenzentrum sowie von Experten von PANGAEA® (Data Publisher for Earth & Environmental Science, Link siehe unten). Momentan trägt das AWI alle Kosten (ein Datenkurator plus technische Unterstützung).

Globale Messungen



▲ Abb. 5.3-2: Aktive, geschlossene und in der Planung befindliche BSRN-Stationen (Stand: Mai 2021)
 (Quelle: DWD nach WRMC)

5.4 Weltklimadatenzentrum am Deutschen Klimarechenzentrum

Das Weltklimadatenzentrum (engl. World Data Center for Climate, WDCC) wird vom Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ GmbH) betrieben, das die Aufgabe hat, der deutschen Klimaforschung Zugang zu Hochleistungsrechnern und Unterstützung bei deren Nutzung zu bieten. Schwerpunkt des Datenbestandes bilden Daten aus Klimamodellrechnungen, aber auch zugeordnete Beobachtungsdaten aus verschiedenen Projekten stehen zur Verfügung.



Beispiele des Datenbestandes am DKRZ

| Projekt | M/B | Abdeckung | Datentyp |
|------------------|-----|---|--|
| CARIBIC | B | Flugrouten Frankfurt-Karibik 1997-2002 | Variablen der Hochatmosphäre |
| CMIP6 | M | Globale Daten für Modellvergleiche aus verschiedenen Zeiträumen | Zahlreiche Variablen internationaler Forschungszentren |
| CORDEX | M | Europa bis 2099 | Zahlreiche Variablen auf 44/11-km-Gitter monatlich und stündlich |
| ReKliEs-De | M | Deutschland bis 2100 | Als Ergänzung zu CORDEX sowie weitere Kennzahlen (Max/Min, Perioden) |
| ECMWF-Reanalysen | B/M | Global 1950 bis heute | Zahlreiche Variablen mit 30-km-Auflösung und höher |
| REMO-UBA | M | Deutschland 2001-2100 | Zahlreiche Variablen auf 10-km-Gitter monatlich und stündlich |

▲ Tabelle 5.4-1: Datenbestand am DKRZ; M - Modelldaten, B - Beobachtungsdaten (Quelle: DKRZ)

Bedeutung für GCOS

Das WDCC sammelt, archiviert und verteilt Klima(modell)datenprodukte, um sie der internationalen Forschergemeinschaft frei zur Verfügung zu stellen. Dabei ist es Referenzdatenarchiv für das Modellvergleichsprojekt CMIP und unterstützt in dieser Funktion auch den IPCC-Prozess durch Datenbereitstellung und -nachweis.

Um eine gute Vernetzung von Datenzentren der Erdsystemforschung zu erreichen, bestehen Kollaborationen mit zahlreichen Instituten verwandter Fachrichtungen wie Erdbeobachtung, Meteorologie, Ozeanographie, Paläoklimatologie und Umweltforschung. Bei den Modelldaten spielen sowohl globale als auch kontinentale und nationale Daten eine Rolle (siehe Tabelle 5.4-1).

Dafür steht mit der nächsten Rechnergeneration seit Herbst 2021 Speicherplatz von rund 120 Petabytes auf Festplatten zur Verfügung sowie über 1 Exabyte auf Magnetbandkassetten. Besonders im Vordergrund steht dabei das projektbezogene Management des gesamten Lebenszyklus von Daten (Data Life Cycle Management). Dazu gehört die Beratung der Projektpartner bei der Antragstellung genauso wie Unterstützung zur Laufzeit, abschließende Datenpublikation und -verteilung sowie eine dauerhafte Speicherung der Ergebnisse. Diese Langzeitdaten können mit persistenten digitalen Kennungen (DOI) versehen werden, die auch nach Jahren noch ein schnelles Auffinden der Daten ermöglichen.

◀ Foto 5.4-1: Das Massenspeicher-Archiv am DKRZ



▲ Foto 5.4-2: Ein Blick ins Plattenarchiv am DKRZ

Internationale Einbettung

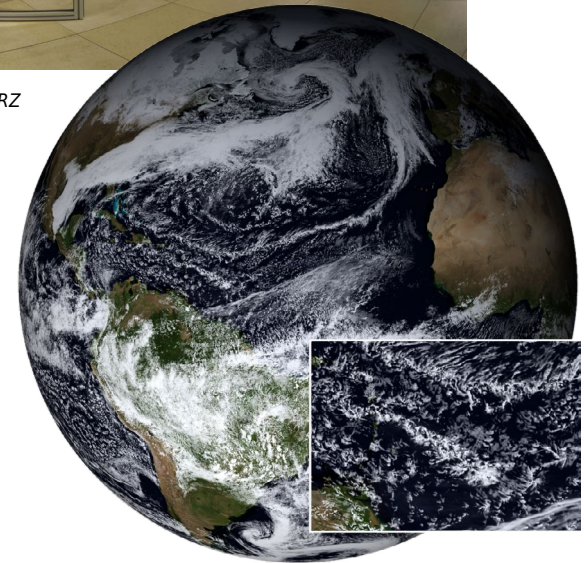
Obwohl das WDCC international ausgerichtet ist und Wissenschaftlern aus aller Welt offen steht, erfolgt der überwiegende Teil der Datenzugriffe aus dem Bereich der deutschen Forschungslandschaft. Dabei sind die Kooperationen mit Universitäten und Großforschungseinrichtungen ebenso bedeutsam wie die Zusammenarbeit mit Instituten der Max-Planck-Gesellschaft oder dem Deutschen Wetterdienst. Internationale Kooperationen bestehen unter anderem in Bereichen,

die die Datennutzung für die Sachstandsberichte des IPCC betreffen. Hier ist das WDCC als Data Distribution Centre (DDC) eingebunden. Auch bei der Bereitstellung von Daten für Modellvergleichsprojekte (z. B. CMIP6) gehört die Hamburger Einrichtung zu den international führenden Datenzentren. Darüber hinaus werden Softwarelösungen von der Nutzerschnittstelle bis zur Dateiablage auf Magnetbändern in internationalen Föderationen gemeinsam entwickelt.

▲ Foto 5.4-3: Der Hochleistungsrechner Mistral am DKRZ

Ressourcenbedarf

Gesellschafter des DKRZ sind die Max-Planck-Gesellschaft und das Land Hamburg (Universität Hamburg) sowie ferner das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) und das Helmholtz-Zentrum hereon GmbH in Geesthacht. Hinzu kommen Fördermittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die Anschaffung der Großtechnologie.



▲ Abb. 5.4-1: Modellrechnung der Atmosphäre mit ICON und 2,5-km-Auflösung (Simulation von DKRZ, MPI-M und DWD), Inset: Region um Barbados (Quelle: DKRZ)

5.5 World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere

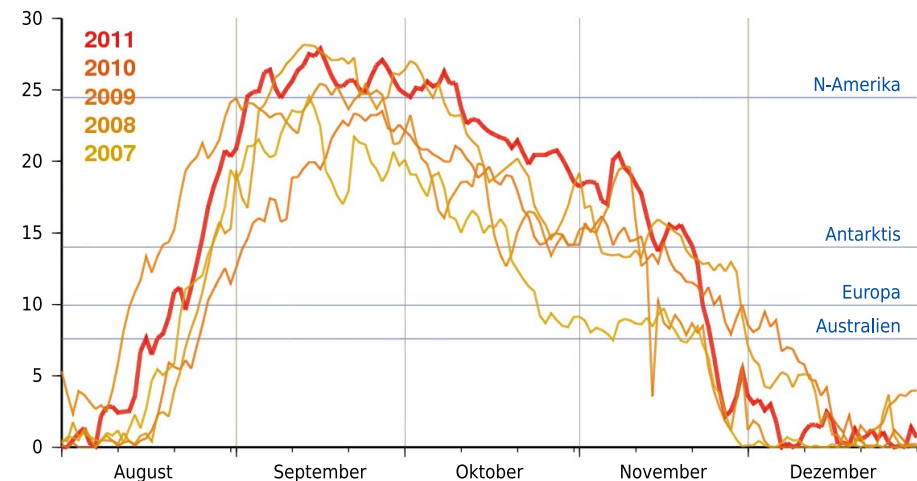
(Der nachfolgende Beitrag entspricht dem im Inventarbericht 2013.) Seit 2003 wird das World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere (WDC-RSAT) vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben, und zwar unter der – nichtstaatlichen – Schirmherrschaft des International Science Council (ISC) und der WMO. Ein externer Fachbeirat mit Vertretern aus Raumfahrtagenturen (ESA), Wetterdiensten (DWD) und der wissenschaftlichen Forschung (HGF und DLR) wurde 2006 eingerichtet, um das WDC-RSAT bei der Erreichung seiner Missionsziele und der Erledigung von Nutzeranforderungen zu unterstützen. Der Fachbeirat wird derzeit um Vertreter von EUMETSAT, der NASA und der WMO erweitert.

Bedeutung für GCOS

Das WDC-RSAT bietet nicht nur den Wissenschaftlern, sondern auch der Öffentlichkeit einen einfachen und kostenfreien Zugang auf eine kontinuierlich wachsende Sammlung atmosphärischer satellitenbasierter Daten, Produkte und Dienstleistungen.

Die Daten sind online verfügbar und beinhalten sowohl die Rohdaten als auch daraus abgeleitete, weiterentwickelte Produkte. Die aktuelle WDC-RSAT-Datenbank verfügt über Informationen über Spurengase, Aerosole, Bewölkung, Land- und Meeresoberflächenparameter und zur Sonnenstrahlung.

Entwicklung der Größe des Ozonlochs für die Jahre 2007–2011 (10^6 km^2)



▲ Abb. 5.5-1: Die Fläche wird über das ROSE/DLR-Chemie- und Transportmodell (CTM) abgeleitet, indem Totalozonkonzentrationen aus MetOp/GOME-2-Messungen assimiliert wurden. Die Größe/Fläche des Ozonlochs ist für einen Bereich definiert, in dem die Konzentration des Gesamt Ozons unter 220 DU liegt. (Quelle: WDC, EUMETSAT und DLR)

Dienst für die wissenschaftliche Gemeinschaft

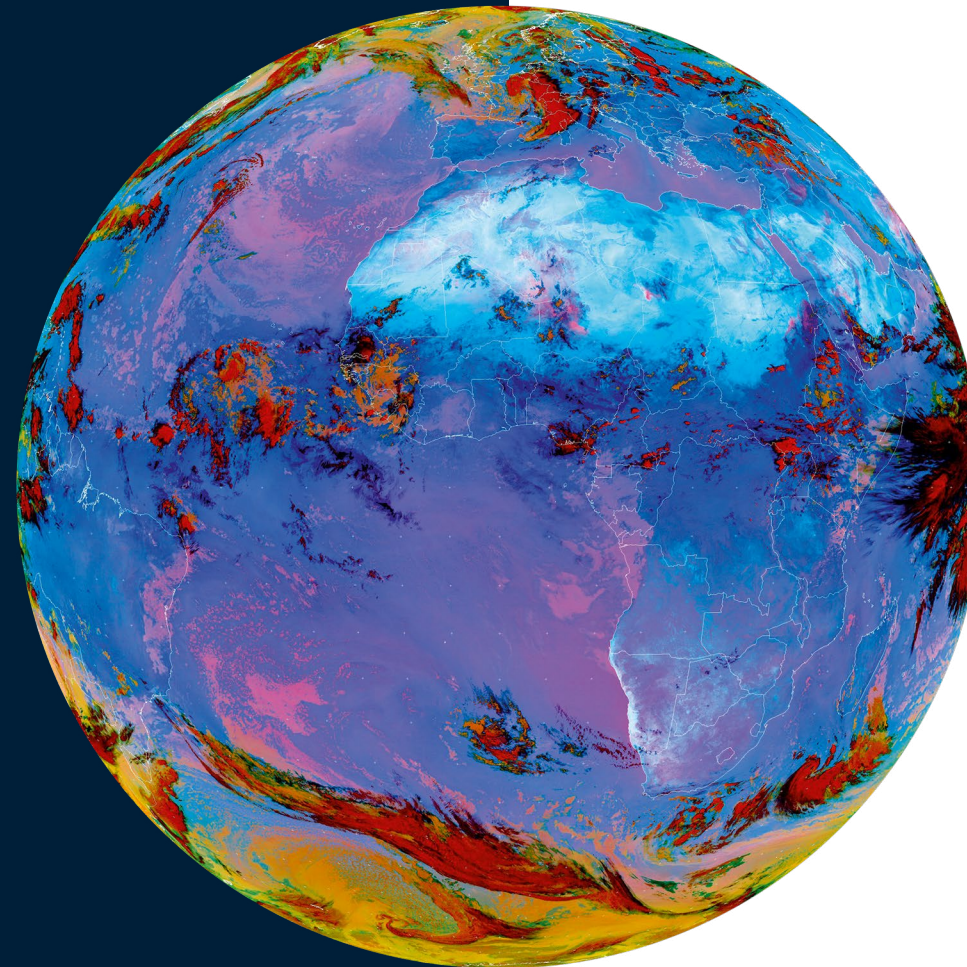
Als neuer Teil der Weltdatenzentren der WMO ist das WDC-RSAT im Rahmen des GAW-Strategieplans 2008–2015 vor allem im Kontext von Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations (IGACO) implementiert worden. Es wird sich mit der Verknüpfung verschiedener GAW-relevanter Datensätze untereinander und mit Modelldaten beschäftigen. In diesem Zusammenhang wird das WDC-RSAT auch mit Daten operieren, die nicht von Satelliten stammen, aber für die Validierung notwendig sind. Zudem werden Strategien und Techniken für eben diese Validierung entwickelt und erprobt, wobei unter anderem auch verschiedene Assimilationsmethoden einbezogen

werden. Das Zentrum berücksichtigt bei der Erledigung seiner Aufgaben auch die Variabilität der Atmosphäre auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen (»miss-integration error«). Es funktioniert wie ein »One-Stop Shop«, der den Zugang zu weltraumgestützten Beobachtungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ermöglicht, sich zunächst aber auf eine begrenzte Anzahl von Parametern, insbesondere hinsichtlich Ozon und Aerosolen, konzentriert. Dies wird dadurch bewerkstelligt, dass der Zugang entweder direkt auf die Datensammlung des WDC-RSAT oder indirekt über ein Portal mit Links zu relevanten anderen Satellitendatenanbietern geschieht. ■ ■ ■



Entsprechend den Empfehlungen des Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) baut das WDC-RSAT derzeit in Zusammenarbeit mit der NASA ein Portal für satellitengestützte Daten zur Zusammensetzung der Atmosphäre (ACP) auf, das letztlich in das Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) integriert sein wird. Ähnliche Kooperationen sind mit dem französischen Centre National d'Études Spatiales (CNES) und dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) geplant.

WDC-RSAT soll eine wichtige Rolle innerhalb des neu gegründeten internationalen und globalen Netzwerks für den Nachweis von Änderungen der Mesopause (NDMC) spielen. Dazu soll die internationale Zusammenarbeit von Forschungsgruppen, die sich aktiv mit der Mesopausenregion (~ 80–100 km Höhe) beschäftigen, gefördert werden, um langfristige Trends des sogenannten Luftleuchtens zu detektieren. Das WDC-RSAT wird außerdem als Kommunikations- und Datenmanagement-Plattform für das weltweite Netzwerk bodengestützter Messungen dienen. Darüber hinaus unterstützt WDC-RSAT die bayerische Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) auf der Zugspitze (2.650 m ü. M.), die ebenfalls eine Station des GAW der WMO ist, bei Fragestellungen rund um das Datenmanagement. Es ist angedacht, eine virtuelle Verbindung zwischen der UFS-Station und dem norwegischen ALOMAR-Observatorium zu errichten.



Internationale Einbettung

Das WDC-RSAT ist Teil der ISC-WDC-Familie und steht daher in Verbindung mit allen anderen Weltzentren. Darüber hinaus wird der Aufbau eines WDC-Subnetzes, das sich auf wesentliche Aspekte des »Systems Erde« konzentrieren soll, zu

synergetischen Effekten bei den einzelnen Datenbetrieben führen. Eine solche zentrale Vorgehensweise, in die auch das RSAT involviert ist, zielt auf die Beantwortung von Fragen zu den Veränderungen

des Klimas und bei den Wetterextremen ab, die von grundlegender Bedeutung für das wirtschaftliche Wohlergehen und für das Verständnis der natürlichen und anthropogenen Klimaschwankungen sind. Da das Klimasystem durch den Zustand und die Veränderungen von Atmosphäre, Landoberflächen und Ozean determiniert ist, sind Daten zur Beschreibung dieser Subsysteme und deren klimabeeinflussenden Mechanismen erforderlich. Viele der benötigten Datensätze werden in vier ISC-Weltzentren, u. a. dem WDCC (betrieben vom Deutschen Klimarechenzentrum) oder PANGAEA® (betrieben vom Alfred-Wegener-Institut (AWI) und der Universität Bremen, vergleiche Beitrag 5.6) gesammelt und archiviert. Im Jahr 2004 wurde der WDC-Verbund »Erdsystemforschung« gegründet.

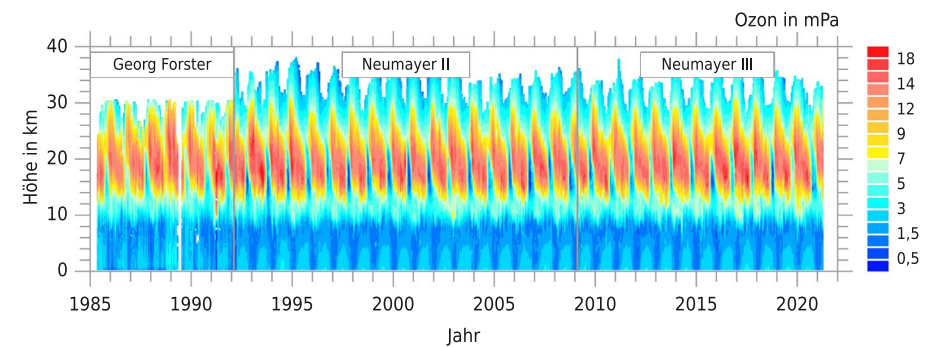
WDC-RSAT kooperiert beim Aufbau und der Nutzung moderner Informationstechnologien (z. B. Grid) mit verschiedenen Partnern, um die gegenseitige Vernetzung weiter zu verbessern. Inzwischen wurde den Datensätzen der Fernerkundung zur Veröffentlichung ein sogenannter Digital Object Identifier (DOI) zugewiesen. Dadurch können diese Daten innerhalb von wissenschaftlichen Publikationen eindeutig und effizient referenziert und schließlich auch zitiert werden. Das WDC-RSAT wird zudem als ein Data Collection or Production Centre (DCPC) innerhalb des Informationssystems WIS der WMO eingestuft.

5.6 ISC-Weltdatenzentrum PANGAEA®

Das Weltdatenzentrum PANGAEA® – Data Publisher for Earth & Environmental Science (pangaea.de), ehemals WDC-MARE, ist Mitglied im World Data System (WDS) des Internationalen Wissenschaftsrats (International Science Council, ISC). PANGAEA® ist eine nach CoreTrustSeal zertifizierte Einrichtung zur Erfassung, Verarbeitung, Langzeitarchivierung und Publikation georeferenzierter Daten der Erdsystemforschung. Aktuell umfasst der Datenbestand rund 400.000 Datensätze mit mehr als 19 Milliarden Datenpunkten.



Messungen der Neumayer- und Georg-Forster-Ozonsonde während dreier »Ozonloch-Perioden« im Oktober



▲ Abb. 5.6-1: Zeitreihe von Ozonsonden-Messungen an den Stationen Neumayer und Georg-Forster in der Antarktis. Alle Daten sind in PANGAEA® publiziert. (Quelle: AWI)

Bedeutung für GCOS

PANGAEA® ist mit seinem umfassenden Datenbestand wertvoller Partner der Klimaforschung. Es ist nicht nur ein vom ISC ausgewiesenes Datenarchiv, sondern umfasst auch das World Radiation Monitoring Center (WRMC) des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) und ist als solches ein von der WMO akkreditiertes Data Collection

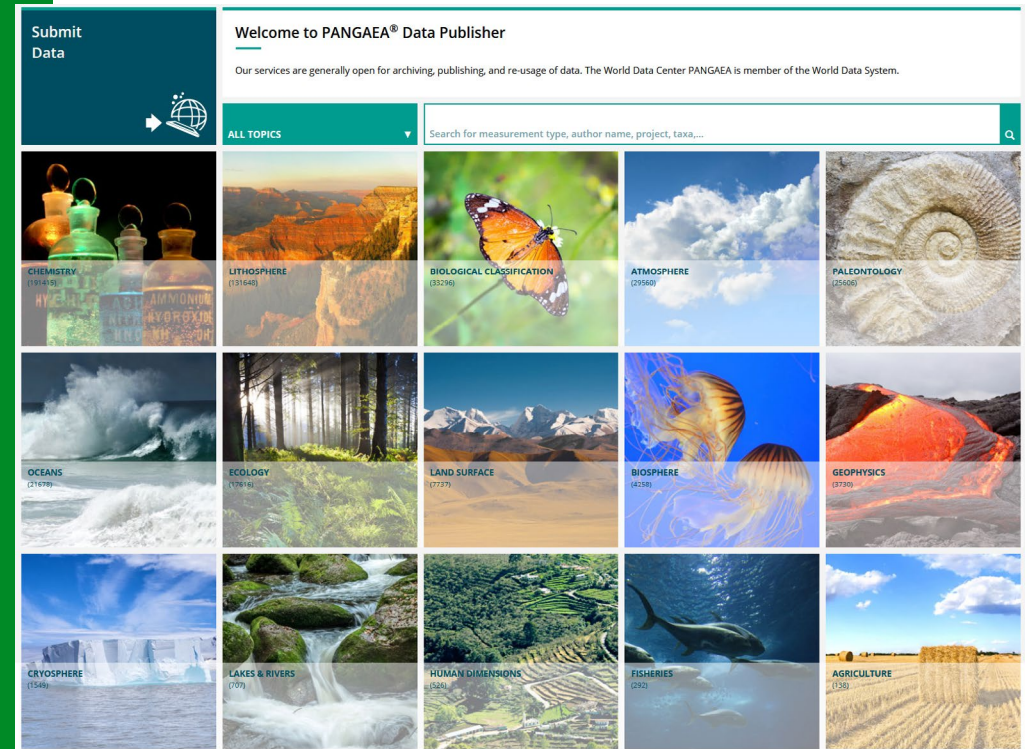
or Production Centre (DCPC). Es unterstützt als WDS den freien und uneingeschränkten Austausch und die Verfügbarkeit von klimarelevanten Daten entsprechend den ISC-Regularien bei gleichzeitigem Schutz geistigen Eigentums durch die persistente Referenzierung der publizierten Daten mit einem Digital Object Identifier (DOI).

Internationale Einbettung

PANGAEA® ist Teil des ISC World Data System. Seit dem 5. Rahmenprogramm der EU unterstützt PANGAEA® mehr als 575 überwiegend hochrangige internationale, EU-weite und nationale Projekte (pangaea.de/projects). Eine langjährige Zusammenarbeit besteht mit dem International Ocean Discovery Program (IODP). Kooperationen mit Wissenschaftsverlagen (Elsevier, Springer, Wiley, Oxford, AGU, Nature) wurden auf- und ausgebaut.

Ressourcenbedarf

PANGAEA® wird gemeinschaftlich vom Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) in Bremen und dem Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven betrieben. Beide Partner stellen insgesamt einen Grundhaushalt von rund 900.000 Euro pro Jahr für den personellen und technischen Betrieb zur Verfügung. Projektarbeit und zusätzliche Dienste werden jährlich durch den gleichen Betrag an Drittmitteln finanziert. Finanzielle Unterstützung wird durch die Europäische Kommission, das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das International Ocean Discovery Program (IODP) gewährt.



▲ Abb. 5.6-2: Screenshot der PANGAEA®-Webseite zur Illustration der verschiedenen in PANGAEA® vorhandenen Datensätze (Quelle: AWI)

5.7 Zentren zur Qualitätssicherung bei GCOS

Das GCOS Surface Network (GSN)

Das GCOS Surface Network (GSN) ist ein Teilkollektiv des Regional Basic Climatological Network (RBCN) und des Antarctic Observing Network (AntON). Diese Messnetze liefern weltweite

monatliche Klimadaten (sog. CLIMAT-Meldungen) aus der unteren Atmosphäre nahe der Erdoberfläche zeitnah nach Monatsende. Das GSN umfasst mehr als 1.000 Landstationen und in



▲ Abb. 5.7-1: Karte der aktuellen GSN-Stationen (Stand: Juli 2021) (Quelle: DWD und GSNMC)

Ozeanen gelegene Inselstationen, die nach strengen Kriterien wie der Länge und Qualität der Zeitreihe, der geographischen Repräsentativität der Beobachtungen und der verfügbaren Parameter ausgewählt wurden. Die GSN-Stationen sollen hohen Ansprüchen hinsichtlich Kontinuität der Messungen und Qualität der monatlichen Klimameldungen genügen. Sie sollen eine Grundlage für Aussagen zur Klimavariabilität und zum Klimawandel sowie für Klimamodellierung und -vorhersage sein (weitere Informationen zum GSN siehe gcos.wmo.int/en/networks/atmospheric/gsn).

Um die Güte des GSN zu überwachen, wurden 1999 zwei GCOS Surface Network Monitoring Centres (GSNMC) eingerichtet, eines beim Deutschen

Wetterdienst (DWD) und eines bei der Japan Meteorological Agency (JMA). Diese kontrollieren die CLIMAT-Meldungen der GSN-Stationen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit, Rechtzeitigkeit und formalen Korrektheit und prüfen die Monatsmitteltemperatur, die mittlere monatliche Minimum- und Maximumtemperatur (JMA) sowie die monatliche Niederschlagshöhe (Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) beim DWD). Verschiedene Monitoringprodukte und die monatlichen Klimadaten werden im Internet unter www.gsnmc.dwd.de bereitgestellt.

Um die Qualität und Verfügbarkeit der Daten des GSN und des GCOS Upper-Air Network (GUAN) zu steigern, wurden in den Jahren 2006/2007 neun CBS Lead Centres for GCOS einge-

◀ Foto 5.7-1: Aufstieg eines Ballons mit mehreren Radiosonden im Rahmen eines Vergleichstests



▲ Abb. 5.7-2: Karte der GRUAN-Stationen (Stand: Juli 2021) (Quelle: DWD)

richtet, die vor allem den Auftrag haben, die nationalen Wetterdienste in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsgebiet über ernannte Ansprechpartner (National Focal Points for GCOS) auf festgestellte Probleme in den Meldungen hinzuweisen. Der DWD ist für Europa (WMO-Region RA VI) zuständig. Nach Beschlüssen des Atmospheric Observation Panel for Climate (AOPC) und des Exekutivrates der WMO 2011 wurde die Verantwortung der CBS Lead Centres auf alle ca. 2.900 Stationen des RBCN und AntON ausgedehnt.

Alle weltweit ausgetauschten CLIMAT-Meldungen werden beim DWD geprüft, vervollständigt und archiviert.

Das GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN)

Das GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN) ist das Referenzmessnetz für Beobachtungen essentieller Klimavariablen in der freien Atmosphäre. An den Stationen des Messnetzes werden vertikal aufgelöste Messungen der Parameter Temperatur, atmosphärischer Wasserdampf, Wind und Druck durchgeführt. Derzeit besteht GRUAN weltweit aus 31 ausgewählten Stationen in unterschiedlichen Klimazonen und ist mit mindestens einer Station auf jedem Kontinent vertreten. Es wird angestrebt, das Messnetz mit zusätzlichen Stationen in Afrika, Südamerika und dem Pazifik zu erweitern. GRUAN-Stationen stellen Referenzdaten für Langzeit-Klimabeobachtungen, zur Validierung von Satellitenbeobachtungen und für Prozessstudien zur Verfügung. Alle GRUAN-Referenzmessungen müssen bestimmte Kriterien erfüllen, wie die Rückführbarkeit (auf SI-Einheiten oder ähnliche Standards), Korrektur aller bekannten systematischen und zufälligen Messfehler sowie eine Analyse der Messunsicherheiten. Die transparente und gut dokumentierte Datenprozessierung der GRUAN-Rohdaten beinhaltet Korrekturalgorithmen, die auf einer ausführlichen Charakterisierung des Messinstruments und dessen Sensorik basieren. Die resultierenden GRUAN-Datenprodukte (GDP) sind frei von herstellerabhängigen Artefakten. Aktuell gibt es GDPs für zwei Radiosonden (Vaisala RS92 und Meisei RS-11G) und für das GNSS-Wasserdampfsäule (GNSS-PW), während das GDP für lidarbasierte Temperatur- und Feuchteprofile sowie zusätzliche GDPs für die Radiosonden Vaisala RS41, Modem M10, Meisei iMS-100 und Graw in Arbeit sind.

GRUAN wurde 2008 gegründet und das dazugehörige Lead Centre ist am Meteorologischen Observatorium Lindenberg – Richard-Äßmann-Observatorium angesiedelt. Die Aufgaben des Lead Centre umfassen die operationelle und organisatorische Führung des Netzwerks, wie z. B. Sicherstellung der Datenflüsse (Verarbeitung und Archivierung),

Koordinierung der Stationen, Berichterstattung, Erstellen von Richtlinien, Veröffentlichung und Pflege von GRUAN-Dokumentationen und des GRUAN-Webauftritts.

Eine große Herausforderung in den letzten Jahren war die Umstellung von der Vaisala RS92 auf die RS41 als operationelle Radiosonde bei der Mehrzahl der GRUAN-Stationen. Die GRUAN-Strategie zur Vermeidung von Inhomogenitäten in der Datenreihe als Konsequenz dieser Umstellung waren netzwerkweite RS92-RS41-Vergleichsaufstiege sowie das Sammeln von Messdaten von Satelliten und anderen Messsystemen zwecks Charakterisierung der Unterschiede beider Radiosondentypen.

Das Lead Centre nimmt unter anderem an internationalen Radiosondenvergleichen teil und führt selbst Tests und Laborstudien von Sondierungsinstrumenten durch. Für diesen Zweck gibt es am Observatorium Lindenberg spezialisierte Laborvorrichtungen, die u. a. bei der Entwicklung des GDP für die RS41 eingesetzt wurden.

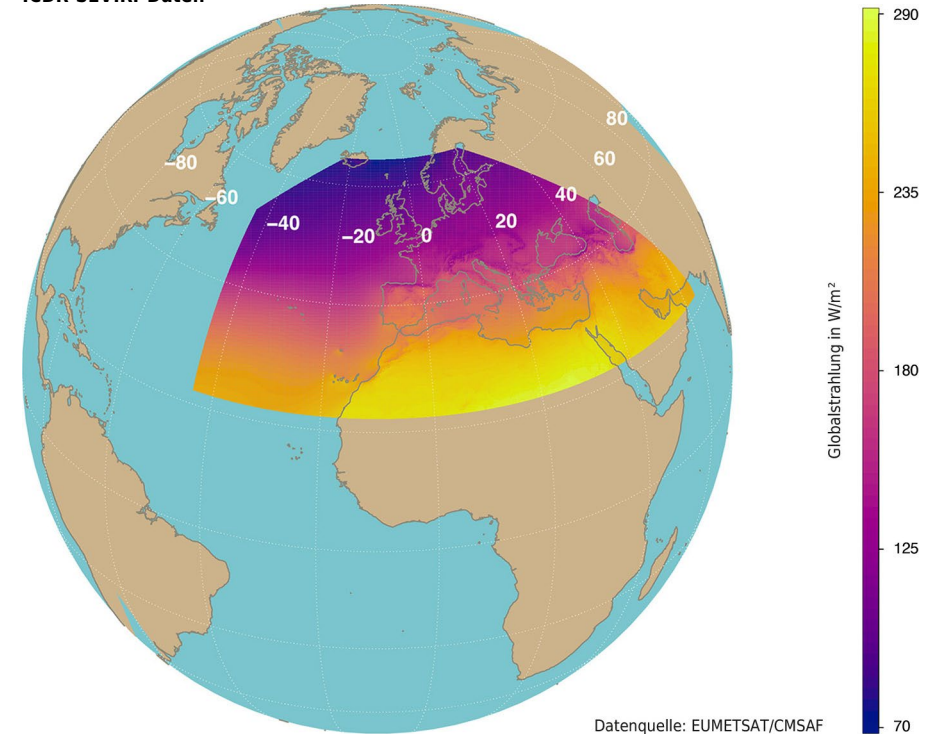
GRUAN ist dem GCOS Atmospheric Observation Panel for Climate (AOPC) untergeordnet und kooperiert eng mit den relevanten Gremien der WMO (INFCOM/SC-MINT, Research Board) sowie mit einer Zahl weiterer nationaler Wetterdienste, um die Beobachtungen auch an Stationen, die nicht direkt GRUAN angeschlossen sind, zu verbessern.

5.8 EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring

Die Sorge um die Entwicklung des Erdklimas hat zu der Schlussfolgerung geführt, dass die Klimaüberwachung auf regionaler und globaler Ebene weiter ausgebaut werden muss. Doch nur satellitengestützte Beobachtungen ermöglichen die erforderliche geographische Abdeckung mit ausreichender Qualität und Aktualität. Besonders über den Ozeanen und dünn besiedelten Gebieten sind Satellitendaten weitgehend die einzige Datenquelle. Die EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) hat sich als Ziel gesetzt, derartige satellitenbasierte, geophysikalische Datensätze für die Klimaüberwachung zur Verfügung zu stellen. Das CM SAF ist Teil eines Netzwerks von Satellite Application Facilities (SAF), das wiederum Bestandteil des EUMETSAT Application Ground Segment ist.



Klimatologie der Globalstrahlung mit Europa-Ausschnitt basierend auf den SARAH- und ICDR-SEVIRI-Daten



▲ Abb. 5.8-2: Klimatologie der Globalstrahlung mit Europa-Ausschnitt basierend auf Monatsmitteln der SARAH- und ICDR-SEVIRI-Daten des CM SAF von 1983 bis 2020 (Quelle: EUMETSAT/CM SAF)

Bedeutung für GCOS

Das CM SAF berechnet verschiedene klimatologische Kenngrößen für einige der sogenannten Essential Climate Variables (ECVs), wie sie auch der Umsetzungsplan des Global Climate Observing System (GCOS) zur Unterstützung des UNFCCC vorsieht. Nach Maßgabe des GCOS Second Adequacy Report konzentriert sich das CM SAF auf die Bereitstellung von geophysika-

lischen Parametern, die den Energie- und Wasserkreislauf beschreiben. Sowohl regionale Produkte mit vergleichsweise hoher räumlicher Auflösung als auch globale Produkte, die die laufenden internationalen Aktivitäten ergänzen, werden vom CM SAF bereitgestellt. Dabei werden die GCOS-Prinzipien zur Klimaüberwachung so weit wie möglich angewendet.

◀ Abb. 5.8-1: Die Daten der polarumlaufenden Satelliten, hier ein Bild des europäischen polaren Satellitensystems, sind wichtige Bestandteile der globalen Klimatologien. (Quelle: DWD nach ESA und EUMETSAT)

Organisation

Das CM SAF ist Teil des SAF-Netzwerks von EUMETSAT, bestehend aus acht Kompetenzzentren, die sich jeweils mit spezifischen wissenschaftlichen Fragestellungen beschäftigen. Das SAF für Klimaüberwachung (CM SAF) wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) betrieben und in Zusammenarbeit mit dem Königlichen Meteorologischen Institut von Belgien (RMI), dem Finnischen Meteorologischen Institut (FMI), dem Königlich Niederländischen Meteorologischen Institut (KNMI), dem Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI), dem Wetterdienst des Vereinigten Königreiches von Großbritannien (UK Met Office), dem französischen Forschungszentrum CNRS sowie dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz betrieben und weiterentwickelt.

Produkte und Dienstleistungen

Das CM SAF stellt satellitengestützte, geophysikalische Datensätze für die Klimaüberwachung bereit, die auf Messungen mehrerer Instrumente an Bord meteorologischer geostationärer und polumlaufernder Satelliten, wie der Meteosat- und EPS-Satelliten, basieren. Die Datenprodukte des CM SAF werden zwischen Daten, die zeitnah zur Klimaüberwachung zur Verfügung gestellt werden, sogenannte ICDRs, und Langzeitdatensätzen, die auf Basis exakt kalibrierter Strahldichten erzeugt werden (TCDRs), unterschieden. Homogene,

qualitativ hochwertige Daten unterstützen Wissenschaftler darin, Klimaschwankungen und langfristige Klimaveränderungen zu untersuchen.

Die erweiterte Produktpalette des CM SAF ist für Anwendungen mit Schwerpunkt auf dem Wasser- und Energiekreislauf in der Atmosphäre sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene zugeschnitten und beinhaltet im Einzelnen:

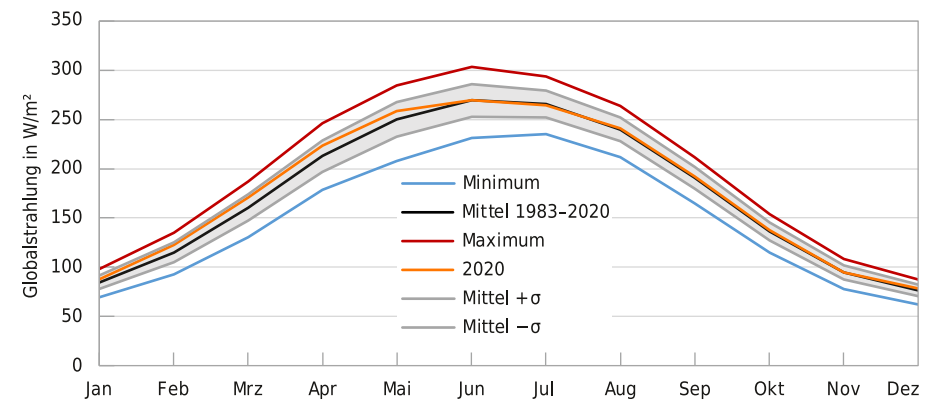
- makro- und mikrophysikalische Wolkeneigenschaften,
- Parameter der Strahlung an der Erdoberfläche, einschließlich Bodenalbedo und Landoberflächentemperatur,
- Strahlungsparameter am Oberrand der Atmosphäre,
- Wasserdampf und Temperatur,
- Niederschlag.

Ein Beispiel für die Kombination von TCDR und ICDR ist in den Abbildungen 5.8-2 und 5.8-3 gezeigt.

Der sogenannte SARAH-Datensatz, der auf Messungen der Meteosat-Instrumente MVIRI und SEVIRI beruht, deckt einen Zeitraum von 1983 bis 2020 ab und ist besonders für Klimabetrachtungen in Europa und Afrika geeignet. Die Abb. 5.8-2 zeigt die Klimatologie der Globalstrahlung mit einem Europa-Ausschnitt.

Abb. 5.8-3 zeigt als Anwendung den ICDR der aktuellen Messungen für 2020 im Vergleich zum mittleren Jahresgang der Globalstrahlung inklusive derer 30-jährigen Variabilität. Somit kann

Mittlere Globalstrahlung (1983-2020) für Europa basierend auf den Datensätzen SARAH und ICDR-SEVIRI



▲ Abb. 5.8-3: Globalstrahlung (1983-2020) für Europa basierend auf den SARAH- und ICDR-SEVIRI-Datensätzen. Dargestellt sind das langjährige monatliche Mittel (schwarz), das langjährige monatliche Maximum (rot), das langjährige monatliche Minimum (blau), die Monatsmittelwerte für 2020 (orange) und der Bereich von \pm einer Standardabweichung um das langjährige Mittel (grauer Bereich). (Quelle: EUMETSAT/CM SAF)

durch den ICDR bewertet werden, ob es sich um ein extremes Ereignis handelt oder nicht. Abb. 5.8-3 zeigt deutlich, dass 2020 das nicht der Fall war.

Das CM SAF offeriert alle seine Produkte kostenfrei für die Wissenschaftsgemeinschaft, einschließlich ausführlicher Dokumentationen und Informationen zur Validierung. Der Nutzerservice wird über die Website cmsaf.eu angeboten. Der Zugriff auf die verfügbaren Daten des CM SAF wird über eine Online-Bestellplattform bewerkstelligt, die eine komfortable Auswahl der Produkte und zusätzlicher Daten und Dienstleistungen, wie etwa eine Gebietsauswahl (siehe wui.cmsaf.eu), ermöglicht.

Internationale Einbettung

Die Produkte und Verfahren des CM SAF stehen nicht nur im Einklang mit den Zielen von GCOS, sondern haben auch Bedeutung für andere internationale Programme, wie das World Climate Programme (WCP) und das World Climate Research Programme (WCRP). Sie sind für die Aktivitäten innerhalb der Group on Earth Observations (GEO) und des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus essentiell. Darüber hinaus ist der DWD auch an europäischen Aktivitäten, wie der ESA Climate Change Initiative, und an verschiedenen EU-Projekten beteiligt, wobei es Schnittstellen zum CM SAF gibt.

6

Messreihen im Ausland



6.1 Meteorologische Messungen an der Neumayer-Station in der Antarktis

Seit 1981 werden an der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer regelmäßig meteorologische Messungen und Beobachtungen durchgeführt. Dabei handelte es sich nicht immer um die gleiche Station: Die erste »Georg-von-Neumayer-Station« musste 1992 aufgrund der Schneeakkumulation aufgegeben werden. Sie wurde von der »Neumayer-Station« abgelöst, welche wiederum 2009 zugunsten der jetzigen Station »Neumayer III« aufgegeben wurde. Das Meteorologische Observatorium Neumayer ist dabei stets mit umgezogen und wurde somit 1992 um ca. 7 km und 2009 um etwa 6 km in südliche Richtung versetzt. Der Ort der Beobachtungen wurde dadurch nicht ganz so stark verändert, da die Station jährlich ca. 145 m durch den Fluss des Ekström-Schelfeises versetzt wird. Das Meteorologische Observatorium Neumayer hat sich über die vier Jahrzehnte seiner Existenz stetig weiterentwickelt und wurde erweitert. So werden seit 1983 tägliche Radiosondierungen durchgeführt. Die Station ist 1992 als Gründungsmitglied dem Baseline Surface Radiation Network (BSRN) beigetreten, um qualitativ hochwertige Bodenstrahlungsmessungen langfristig in situ zu messen. Das Radiosondierungsprogramm wurde 1993 um regelmäßige Ozonsondierungen erweitert. Seit 2019 ist Neumayer nun auch Mitglied im GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN).



▲ Foto 6.1-1: Die Station Neumayer III ($70^{\circ} 40' S$, $8^{\circ} 16' W$) auf dem Ekström-Schelfeis im Dezember 2018. Die Messgeräte des Meteorologischen Observatoriums befinden sich 350 m südwestlich des Hauptgebäudes sowie teilweise auch auf dem Dach der Station. Rechts oben im Bild ist das Spurenstoffobservatorium zu sehen, welches südlich 1.500 m von der Station entfernt ist.

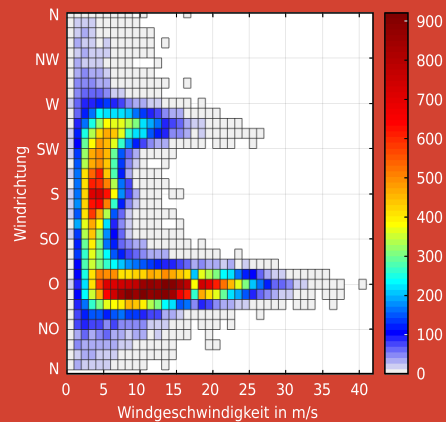
Bedeutung für GCOS

GCOS hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Überwachung langfristiger Veränderungen essentieller Klimavariablen in Beobachtungsnetzwerken zu organisieren. Das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) unterstützt die Aufgaben des GCOS in verschiedenen Bereichen. Durch den Betrieb des

Meteorologischen Observatoriums Neumayer unterstützt es maßgeblich die Datenerhebung in dem sehr datenarmen Gebiet der Antarktis. Die Mitgliedschaften in BSRN und GRUAN sollen dabei in besonderer Weise die hohen Qualitätsansprüche an Langzeitdatenreihen fördern.

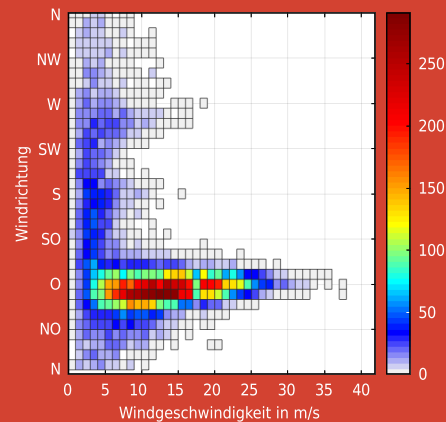
6.1 Meteorologische Messungen an der Neumayer-Station in der Antarktis

Alle Windmeldungen 1981-2021



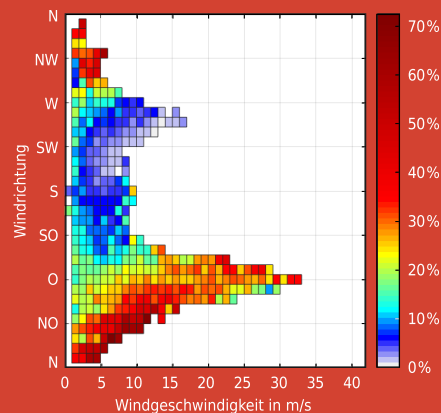
▲ Abb. 6.1-1a: Windverteilung an Neumayer. Man kann deutlich die drei dominierenden Wetterregime erkennen: häufige und starke Ostwinde durch Zyklonen nördlich des Ekström-Schelfeises, katabatische Winde aus Süd und gelegentliche Südwestwinde durch Hochdruckrücken über dem Weddellmeer. Nordanströmung der Station ist aufgrund der Topographie des Eisschildes selten. (Quelle: AWI)

Windmeldungen mit Schneefall 1981-2021



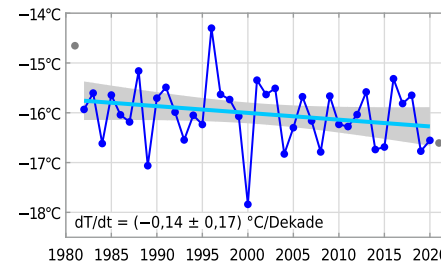
▲ Abb. 6.1-1b: Schneefall tritt in den allermeisten Fällen zusammen mit Ostwind auf. (Quelle: AWI)

Relative Häufigkeit Schneefall 1981-2021



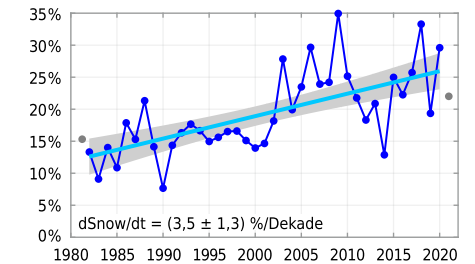
◀ Abb. 6.1-1c: Die meisten Fälle von nördlicher Anströmung verursachen Schneefall an der Station (bis über 70%). Solche Beobachtungen sind häufig assoziiert mit »atmospheric rivers«, die sehr viel Feuchtigkeit von Nord nach Süd transportieren. Aus südlicher und südwestlicher Richtung wird kaum Feuchtigkeit zur Station transportiert. (Quelle: AWI)

2-m-Lufttemperatur



▲ Abb. 6.1-2: Die 2-m-Temperatur an der Neumayer-Station hat sich im Jahresmittel seit Aufzeichnungsbeginn 1981 nicht signifikant verändert. Die statistische Unsicherheit (0,17 °C/Dekade) ist größer als der rechnerische Trend (-0,14 °C/Dekade). Die grauen Punkte am Beginn und Ende der Zeitreihe basieren auf unvollständigen Jahresdaten und wurden nicht in die Trendanalyse mit eingerechnet. (Quelle: AWI)

Anteil Wetterbeobachtungen mit Schneefall



▲ Abb. 6.1-3: An Neumayer werden seit 1981 alle 3 Stunden synoptische Wettermeldungen erstellt. Hier dargestellt ist der Anteil an von Wetterbeobachtern erstellten Meldungen, in denen Niederschlag (Schneefall) beobachtet wurde. Es scheint einen deutlichen Anstieg hin zu häufigeren Schneefallereignissen zu geben. Die grauen Punkte am Beginn und Ende der Zeitreihe basieren auf unvollständigen Jahresdaten und wurden nicht in die Trendanalyse mit eingerechnet. (Quelle: AWI)

Ressourcenbedarf

Das AWI in Bremerhaven betreibt die Antarktisforschungsstation Neumayer mitsamt dem Meteorologischen Observatorium und trägt alle dazu notwendigen Kosten im Rahmen der Helmholtz-Finanzierung von Forschungsinfrastruktur. Die Forschungsstation als solche, aber auch Elemente des Observatoriums, stehen dabei allen Forschungsinteressierten offen. Nutzeranträge werden an das AWI gestellt und von einem international besetzten Nutzerbeirat begutachtet.

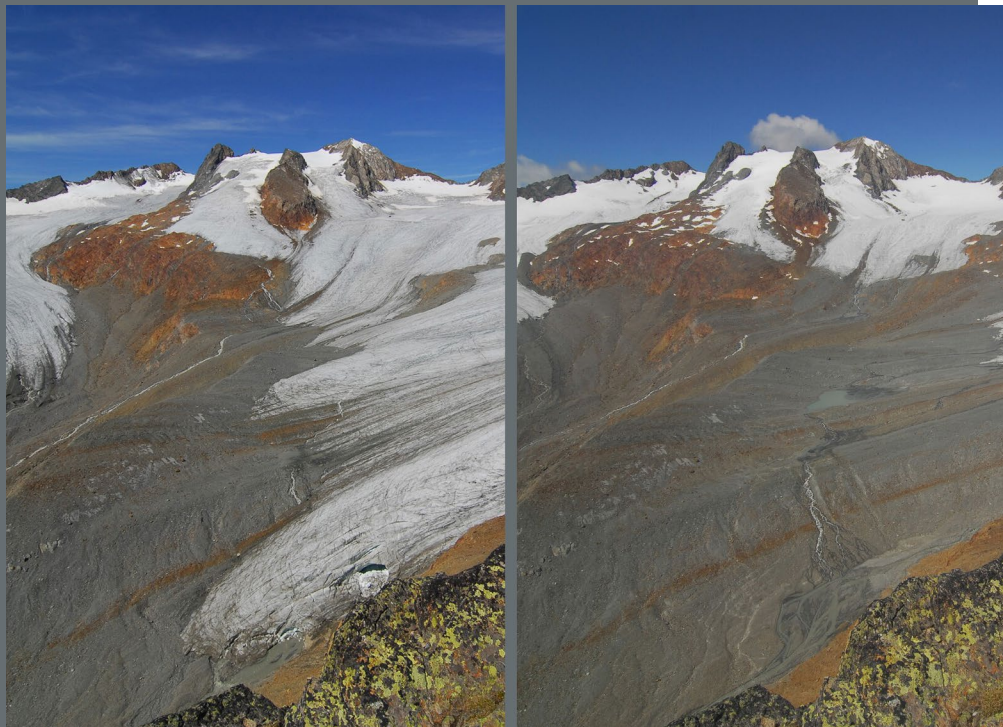
Datenarchiv

Sämtliche erhobenen Daten des Meteorologischen Observatoriums Neumayer werden, in der Regel einmal jährlich, qualitätsgeprüft in dem wissenschaftlichen Datenarchiv PANGAEA® archiviert.

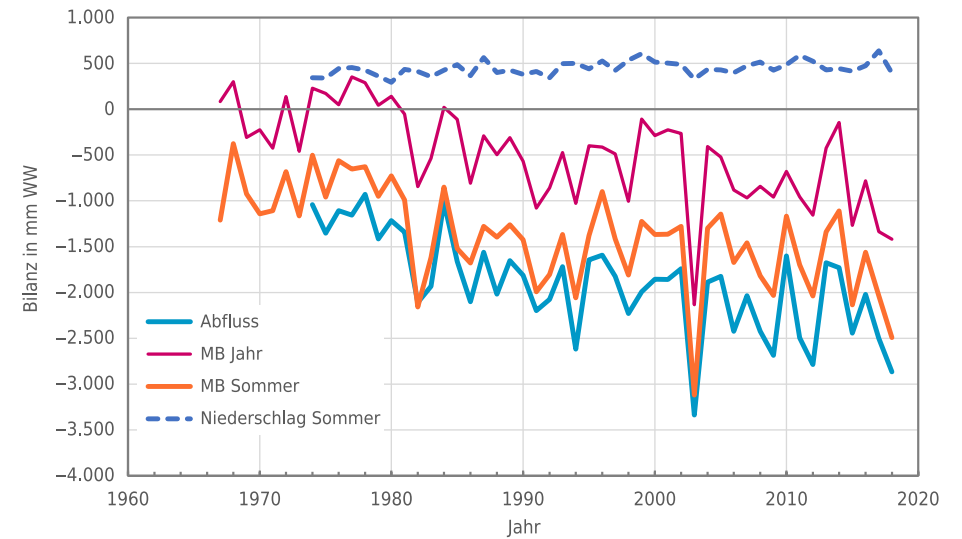


6.2 Gletscherüberwachung im Ausland

Die Gruppe Erdmessung und Glaziologie (KEG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften bestimmt die Flächenänderung von zehn Gletschern in Österreich seit 1889 in Zehn-Jahres-Intervallen. Für den Vernagtferner (VF) im Ötztal werden zusätzlich die Jahreswerte der Massenbilanzen seit 1964 analysiert und seit 1974 der Gesamtabfluss des Gletschers auf Stundenbasis registriert.



Flächenskalierte glaziologische Jahres- und Sommermassenbilanzen, Jahressummen des Abflusses und Sommerniederschlag für das Einzugsgebiet Pegelstation Vernagtferner



▲ *Abb. 6.2-1: Die Grafik zeigt für den Vernagtferner im Ötztal die mit der direkten glaziologischen Methode bestimmten Massenbilanzen seit 1964/65 für das gesamte Jahr (lila) und den Sommer (orange, Mai–Oktober) und die an der Pegelstation Vernagtbach seit 1974 registrierten Jahressummen des Abflusses (hellblau). Zusätzlich ist der Sommerniederschlag dargestellt (dunkelblau gestrichelt, Mai–Oktober). Der lineare Abflusstrend liefert einen Anstieg von 1.300 mm auf 2.500 mm von 1974 bis 2018. Noch größer ist der tendenzielle Anstieg in der Sommermassenbilanz. Die Absolutwerte liegen 1974 bei etwa –990 mm Wasseräquivalent (mm WW), am Ende des Zeitraums bei mehr als –1.900 mm WW. Dagegen zeigt der Sommerniederschlag nur eine schwache Tendenz von etwa 390 mm auf 500 mm. (Quelle: BAdW)*

◀ *Foto 6.2-1: Aufnahmen des Zentralteils des Vernagtferners mit automatischer Kamera am 25.08.2010 (links) und 19.08.2021 (rechts)*

Beschreibung der Messreihen

Von den durch die KEG überwachten 15 Ostalpengletschern liegen 10 in Österreich, diese werden überwiegend mit der geodätischen Methode untersucht. Vier Gletscher befinden sich im Ötztal (Vernagt-, Guslar-, Hintereis- und Gepatschferner), zwei Gletscher im Stubai (Sulzenau- und Grönauferner) und vier

Gletscher im Zillertal (Schwarzenstein-, Horn-, Waxegg- und Schlegeiskees). Die längste Aufnahmeserie liegt vom VF vor (vgl. Grafik und Methodenbeschreibung in Beitrag 4.6 Gletscher und Permafrost), die zweitlängste seit 1894 für den Hintereisferner. Der Gepatschferner und alle Gletscher im Zillertal wer- ■ ■ ■

■ ■ ■

den seit 1921 überwacht, die Gletscher im Stubai seit 1932. Alle Massenänderungsreihen weisen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf auf, mit starken Verlusten bis etwa 1950, leichten Gewinnen vor allem zwischen 1960 und 1980 und anschließenden noch stärkeren Verlusten als in der ersten Jahrhunderthälfte. Der mittlere Dickenverlust des VF betrug im Zeitraum von 1889 bis 1969 rund 30 cm/a, die Fläche schrumpfte von 11,58 km² auf 9,56 km². Im Jahr 2009 lag sie bei 7,92 km². Der Gletscher hatte sich in zwei Teilgebiete aufgeteilt. Eine Messung der Eisdicke des Vernagtferners mit Georadar im Jahr 2006 ergab einen mittleren Wert von 31 m. Seitdem hat sich die Fläche des Vernagtferners auf 6,9 km² in 2018 reduziert, während die mittlere Eisdicke noch etwa 20 m betrug.

Seit 1964 wird am VF die Massenbilanz mit der direkten glaziologischen Methode bestimmt und zwar separat für die Akkumulations- und Ablationsperiode (Abb. 6.2-1). Die getrennte Analyse von Winter und Sommer zeigt, dass der starke Verlust an Eismasse nicht auf verringerte Niederschläge im Winter, sondern auf hohe Abschmelzbeträge im Sommer zurückzuführen ist. Die Reihe resultiert in einem mittleren Gesamtverlust von 23,7 m Wasseräquivalent für den Zeitraum von 1964 bis 2018, mit den höchsten Verlusten im Jahr 2003.

Im Jahr 1973 wurde die Pegel- und Klimastation Vernagtbach in 2.640 m Höhe als höchstgelegene Abflussmessstelle der Ostalpen errichtet. Sie wird als unbemannte Station mit monatlichen Wartungen zwischen April und November betrieben. Von 1974 bis Mitte der 1980er-Jahre wurden meteorologische und hydrologische Parameter überwiegend im Sommer, seit mehr als 30 Jahren praktisch ganzjährig, registriert. Diese umfassen Messungen von Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur, den vier Strahlungskomponenten, Luftdruck, Luftfeuchte, Schneehöhe und verschiedenen weiteren hydrologischen Parametern. Tägliche Fotografien des Gletschers liegen für die Sommermonate seit 1976 vor, direkte Ablationsmessungen auf der Eisoberfläche seit 2005. Alle meteorologischen und hydrologischen Datensätze können von der Datenbank PANGAEA® kostenfrei abgerufen werden.



◀ Foto 6.2-2: Automatische Wetterstation am Hochvernagtplateau in 3.450 m Höhe. An dieser Station wird die Entwicklung der Schneedecke kontinuierlich beobachtet und gleichzeitig werden die wichtigsten meteorologischen Komponenten aufgezeichnet.

Ressourcenbedarf

Die Beobachtungsaufgaben der Gruppe Erdmessung und Glaziologie der BAdW werden durch institutionelle Mittel finanziert. Allerdings erfordert die anfallende Datenmenge und die Betreuung der

Station zusätzliche Arbeitskraft für die Qualitätsprüfung, Archivierung und die wissenschaftliche Aufarbeitung. Dazu werden derzeit Finanzierungsoptionen geprüft.

Schlussfolgerungen und Ausblick



Die Politik ist gefordert wo nötig Beobachtungsreihen zu sichern

Der vorliegende Bericht basiert auf dem 2013 erschienenen ersten Inventarbericht. Dieser wurde überarbeitet, aktualisiert (wo dies möglich war) und sofern erforderlich an die Liste der ECVs entsprechend dem GCOS-Implementierungsplan von 2016 (WMO 2016) angepasst. Er bietet einen guten Überblick über den derzeitigen Stand der Erhebung der für Deutschland relevanten Klimavariablen auf Bundes- und Landesebene und dokumentiert somit die deutschen Beiträge zum Globalen Klimabeobachtungssystem (GCOS). Anhand langer Zeitreihen kann für viele der Variablen die Entwicklung des Klimasystems in Deutschland nachvollzogen werden. Der Bericht gibt einen Überblick über die rechtlichen Grundlagen und weist auch auf Defizite bei der Nachhaltigkeit der Beobachtungsaktivitäten hin (Tabelle 7-1). Er liefert damit eine wichtige Planungsgrundlage für den Erhalt und Ausbau des deutschen Klimabeobachtungssystems (GCOS-DE).

Schlussfolgerungen

Wie im GCOS Implementation Plan (WMO 2016) dargelegt, hängt das globale System GCOS von gut funktionierenden nationalen Systemen ab. Daher hat der 17. WMO-Kongress (WMO 2015) in seiner Resolution 39 die Mitgliedsstaaten nachdrücklich aufgefordert »[...]

1. ihre nationalen atmosphärischen, ozeanographischen und terrestrischen Klimabeobachtungsnetze und -systeme zu stärken, einschließlich der Netze und Systeme für den Wasser- und Kohlenstoffkreislauf und die Kryosphäre im Rahmen von GCOS und zur Unterstützung des Nutzerbedarfs;
2. die Entwicklungsländer dabei zu unterstützen, ihre Beobachtungsnetze zu stärken, ihre Fähigkeit zur Erfassung klimarelevanter Daten zu verbessern und ihre Bereitstellung von Klimadiensten zu verbessern durch die Durchführung von Projekten in den 10 regionalen Aktionsplänen des GCOS und durch Beiträge zur Umsetzung des Programms ClimDev Africa und zu ähnlichen Initiativen in anderen Regionen;
3. so weit wie möglich die langfristige Kontinuität der kritischen weltraumgestützten Komponenten des GCOS sicherzustellen, einschließlich der Erzeugung und Verbreitung der satellitengestützten Klimadaten und -produkte auf der Grundlage der wesentlichen Klimavariablen, die erforderlich sind, um den Bedürfnissen der NMHS, der Konferenz der Vertragsparteien des UNFCCC, des

IPCC und anderer Nutzer von Klimadiensten zu erfüllen;

4. nationale GCOS-Ausschüsse einzurichten und nationale GCOS-Koordinatoren zu bestimmen, um koordinierte nationale Maßnahmen für Klimabeobachtungssysteme zu erleichtern, unter Berücksichtigung der gemeinsamen internationalen Trägerschaft von GCOS und der sich entwickelnden internationalen Vereinbarungen für GEOSS und GFCS; [...].«

Neben den essentiellen Klimavariablen (ECVs), die für Aussagen auf globaler, regionaler und nationaler Ebene festgelegt sind, können aufgrund lokaler Besonderheiten zusätzliche Klimavariablen von Interesse sein. Für Deutschland wurden Informationen zu Pollen und zur Phänologie der Pflanzen als solche zusätzlich relevanten Variablen identifiziert. Teilweise existieren hierzu auch europäische Beobachtungsnetze.

Noch sind im Klimasystem nicht alle Prozesse und Wechselwirkungen restlos verstanden. Neben neuen, zielgerichteten Untersuchungen spielt die nachhaltige Fortsetzung der vorhandenen langen Beobachtungsreihen eine wichtige Rolle, um weiterhin eine breite Datenbasis für Forschung und die Entwicklung bzw. Verbesserung von Klimamodellen bereitzustellen. Dies trägt dazu bei, bestehende Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Klimas weiter zu reduzieren.

Dieser Bericht soll daher motivieren, das Weiterbestehen langer Beobachtungsreihen, insbesondere der ECVs, sicherzustellen. Die Tabelle 7-1 zeigt, ■■■

Tabelle 7-1: Zusammenstellung der Klimavariablen und ihres Status bezüglich gesetzlicher Grundlagen, verantwortlicher Institution(en) und finanzieller Ressourcen. Bei den ozeanischen Beobachtungen sind in den Beiträgen auch Informationen über Aktivitäten außerhalb deutscher Hoheitsgebiete integriert. (Quelle: DWD) ▼



wo gesetzliche Grundlagen für Beobachtungen fehlen bzw. nicht identifiziert werden konnten, wo die Fortführung der Beobachtungen unsicher ist und/oder

Mittel fehlen. Die Aussagen beruhen auf einer Aus- und Bewertung der von den Fachautorinnen und -autoren bereitgestellten Informationen.

| Klimavariablen | Gesetzliche Grundlagen | Zuständige/federführende Institution(en) | Nachhaltigkeit der Beobachtungen (finanzielle Ressourcen) | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---------------------------|
| Atmosphärische Beobachtungen | | | | |
| Bodennah | 2.1 Temperatur und Feuchte | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.2 Wind | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.3 Luftdruck | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.4 Niederschlag | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.5 Strahlung | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.6 Sonnenscheindauer | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| Freie Atmosphäre | 2.7 Temperatur, Wind und Wasserdampf | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.8 Wolken | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.9 Blitzbeobachtungen | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| Zusammensetzung der Atmosphäre | 2.10 Kohlendioxid | ja | Umweltbundesamt und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 2.11 Methan | ja | Umweltbundesamt und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 2.12 Weitere Treibhausgase | ja | Umweltbundesamt und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 2.13 Anthropogene Treibhausgasflüsse | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.14 Ozon | ja | Deutscher Wetterdienst, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) (Polarstationen), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und Universität Bremen (Satellitendaten) | im Wesentlichen gesichert |
| | 2.15 Aerosole | ja | Umweltbundesamt und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| 2.16 Pollen | ja | Deutscher Wetterdienst und Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst | zum Teil gesichert | |



| Klimavariablen | Gesetzliche Grundlagen | Zuständige/federführende Institution(en) | Nachhaltigkeit der Beobachtungen (finanzielle Ressourcen) | |
|---------------------------------|--|--|--|---------------------------|
| Ozeanische Beobachtungen | | | | |
| Ozeanphysik | 3.1 Ozeanoberflächentemperatur | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.2 Temperatur in der Wassersäule | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.3 Salzgehalt in der Wassersäule | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.4 Meeresspiegel | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.5 Seegang | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Länder und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.6 Meereis | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.7 Meeresströmungen | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.8 Windschubspannung | ja | Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.9 Oberflächenwärmefluss | ja | Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| Biogeochemie | 3.10 Biomasse/Ocean Colour | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.11 Nährstoffe | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Länder und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.12 Sauerstoff | ja | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Länder und Forschungsinstitute | im Wesentlichen gesichert |
| | 3.13 Anorganischer Kohlenstoff im Meer | nein | Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 3.14 Lachgas (N ₂ O) im Ozean | nein | Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 3.15 Messung anthropogener Spurengase im Ozean | nein | Forschungsinstitute | nicht gesichert |
| Ökosysteme | 3.16 Plankton | ja | Länder und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |
| | 3.17 Marine Habitate | ja | Länder und Forschungsinstitute | zum Teil gesichert |

| Klimavariablen | Gesetzliche Grundlagen | Zuständige/federführende Institution(en) | Nachhaltigkeit der Beobachtungen (finanzielle Ressourcen) | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|--|---------------------------|
| Terrestrische Beobachtungen | | | | |
| Hydrosphäre | 4.1 Abfluss | ja | Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Bundesanstalt für Gewässerkunde und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.2 Wassernutzung | ja | Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.3 Grundwasser | ja | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.4 Seen | nein | Länder | im Wesentlichen gesichert |
| Kryosphäre | 4.5 Schneedecke | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.6 Gletscher und Permafrost | ja | Bayerische Akademie der Wissenschaften und Bayerisches Landesamt für Umwelt | im Wesentlichen gesichert |
| Biosphäre | 4.7 Albedo | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.8 Kohlenstoff im Boden | nein | Thünen-Institut, Bund und Länder | nicht gesichert |
| | 4.9 Oberirdische Biomasse im Wald | ja | Bund und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.10 Waldbrand | ja | Deutscher Wetterdienst und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.11 Bodenfeuchte | ja | Deutscher Wetterdienst und Länder | im Wesentlichen gesichert |
| | 4.12 Phänologie | ja | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |

| Klimavariablen | Gesetzliche Grundlagen | Zuständige/federführende Institution(en) | Nachhaltigkeit der Beobachtungen (finanzielle Ressourcen) |
|--|---|---|---|
| Internationale Datenzentren | | | |
| 5.1 Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie | nicht erforderlich ¹⁾ | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| 5.2 Global Runoff Data Centre | nicht erforderlich ¹⁾ | Bundesanstalt für Gewässerkunde | im Wesentlichen gesichert |
| 5.3 World Radiation Monitoring Center | nicht erforderlich ¹⁾ | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | im Wesentlichen gesichert |
| 5.4 Weltklimadatenzentrum am Deutschen Klimarechenzentrum | nicht erforderlich ¹⁾ | Max-Planck-Gesellschaft, Hamburg (Universität Hamburg), Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), Helmholtz-Zentrum Hereon und Bundesministerium für Bildung und Forschung | im Wesentlichen gesichert |
| 5.5 World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere | nicht erforderlich ¹⁾ (Beitrag 2013) | Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt | im Wesentlichen gesichert |
| 5.6 ISC-Weltklimadatenzentrum PANGAEA® | nicht erforderlich ¹⁾ | Zentrum für Marine Umweltwissenschaften und Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | im Wesentlichen gesichert |
| 5.7 Zentren zur Qualitätssicherung bei GCOS | nicht erforderlich ¹⁾ | Deutscher Wetterdienst | im Wesentlichen gesichert |
| 5.8 EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring | nicht erforderlich ¹⁾ | Konsortium der Satellite Application Facility on Climate Monitoring (Deutscher Wetterdienst, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites und weitere Partner) | im Wesentlichen gesichert |
| Messreihen im Ausland | | | |
| 6.1 Meteorologische Messungen an der Neumayer-Station in der Antarktis | ja | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | im Wesentlichen gesichert |
| 6.2 Gletscherüberwachung im Ausland | nicht erforderlich ¹⁾ | Bayerische Akademie der Wissenschaften | im Wesentlichen gesichert |

1) in der Regel Selbstverpflichtung des Bundes

Der Betrieb der Klimabeobachtungssysteme basiert für den überwiegenden Teil der atmosphärischen, ozeanischen und terrestrischen ECVs (Kapitel 2 bis 4) auf gesetzlichen Grundlagen. Darüber hinaus sind völkerrechtliche Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland zu erfüllen, die sich z. B. aus der Klimarah-

menkonvention, dem Kyoto-Protokoll, dem Übereinkommen von Paris oder der deutschen Beteiligung an GEOSS, Copernicus und GCOS ergeben. Dennoch müssen die Beobachtungen für einige ECVs als nicht gesichert eingestuft werden. Andere Aktivitäten sind nur zum Teil oder nur bis zu einem bestimmten Termin gesichert,

mit entsprechenden Unsicherheiten für eine Fortführung. Hinzu kommt, dass aufgrund fehlender Ressourcen die Daten z. B. nicht in vollem Umfang genutzt bzw. ausgewertet werden können oder ein hohes Risiko größerer Datenlücken besteht, was für klimatologische Auswertungen äußerst problematisch ist. ■■■



Es sollte daher darauf hingewirkt werden, dass alle auf gesetzlichen Vorgaben beruhenden Klimabeobachtungen, mindestens aber die für Deutschland relevanten ECVs, nachhaltig gesichert sind. Dies gilt sowohl für In-situ- als auch fernerkundende Verfahren und muss stets auch die Auswertung der Daten beinhalten, einschließlich entsprechender Verfahren zur Qualitätssicherung, Archivierung und Bereitstellung der Daten. Dabei sollten alle Betreiber von Beobachtungssystemen dokumentieren, wie sie die GCOS-Prinzipien zur Klimaüberwachung befolgen (WMO 2003a, siehe auch Tabelle 1-2).

Auch im Hinblick auf internationale Daten- und Produktzentren leistet Deutschland wertvolle Beiträge zu GCOS. Diese Zentren stellen qualitativ hochwertige und vielfach einmalige Datensätze und Produkte für die verschiedensten Nutzungen zur Verfügung. Der größte Teil der internationalen Zentren ist gesichert. Das im Inventarbericht von 2013 noch enthaltene Global Fire Monitoring Center (GFMC) ist hier nicht erneut aufgeführt, da es kein (Klima)Datenzentrum ist.

Neben der Erhebung von Informationen über Zustand und Entwicklung des Klimasystems in Deutschland leistet Deutschland auch außerhalb seines Hoheitsgebietes Beiträge zu GCOS. Mit Ausnahme der Beobachtungen an der Neumayer-Station in der Antarktis werden diese als nicht gesichert eingeschätzt (vgl. Tabelle 7-1). Die seit Jahrhunderten durchgeführten kontinuierlichen Aufzeichnungen zu den atmosphärischen Prozessen haben sich inzwischen als unverzichtbarer wissenschaftlicher

»Schatz« für das Klimaverständnis erwiesen. Es muss daher weiterhin Ziel sein, eine gleichermaßen nachhaltige Beobachtung der ECVs auch in den Ozeanen und an deren Oberfläche zu erreichen, um kritische Veränderungen, etwa bei der Ozeanversauerung oder der Stärke der thermohalinen Zirkulation, rechtzeitig erkennen und verstehen zu können.

Bewertung

Insgesamt ist der Zustand von GCOS-DE weiterhin als gut zu bezeichnen. Dies gilt für die Qualität der erhobenen Daten ebenso wie für die Nachhaltigkeit der Beobachtungsprogramme – von einigen Ausnahmen abgesehen.

Ein Defizit besteht derzeit in der nachhaltigen Beobachtung der Treibhausgase als wesentlicher Antrieb des Klimasystems. Daher sollten insbesondere die Programme zur Beobachtung der Treibhausgase verstetigt werden, da es sich hier um Kerngrößen zur Beschreibung des Klimasystems und für den Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen handelt. Erste Schritte in diese Richtung wurden unternommen und mit dem Aufbau eines operationellen Verifikationsschemas für Treibhausgasemissionen werden Bedeutung und fachliche Belastbarkeit der Beobachtungen noch zunehmen.

Da für mehrere Klimavariablen ein zusätzlicher Bedarf zur Auswertung der Daten gemeldet wird, sollte die Ressourcenausstattung im Hinblick auf eine optimale Nutzung der Daten überprüft werden.

Aufgrund verteilter Zuständigkeiten bei einigen der aufgeführten Klimavariablen war eine Vielzahl von Fachautorinnen und -autoren notwendig, um eine mög-

lichst umfassende Gesamtsicht der Variablen für Deutschland erhalten zu können. Unser Dank gilt allen Beitragenden.

Ein übergeordnetes, internetbasiertes Klimainformationssystem, das einen stets aktuellen Überblick über Zustand und Entwicklung des gesamten Klimasystems in Deutschland gibt und die Ergebnisse von GCOS-DE darstellt sowie die jeweils verantwortlichen Institutionen aufzeigt, wäre ein nützliches Hilfsmittel für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft, aber auch für die breite Öffentlichkeit.

Ausblick

Die Sicherstellung der nachhaltigen Kontinuität der wichtigsten deutschen Klimabeobachtungen ist anzustreben. Der beim Deutschen Wetterdienst angesiedelte nationale GCOS-Koordinator wird sich auch zukünftig für dieses Ziel einsetzen. Zur Unterstützung werden die Ergebnisse aus diesem Bericht ebenso wie Empfehlungen der jährlichen nationalen GCOS-Treffen regelmäßig der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel zur weiteren Entscheidung vorgestellt. Auf die Einhaltung der GCOS-Prinzipien zur Klimaüberwachung (siehe Tabelle 1-2) sollte besonders Wert gelegt werden, damit die Daten frei von unerwünschten künstlichen Störsignalen sind. Um die Daten von heute auch in Zukunft noch richtig einordnen zu können, ist darüber hinaus auf eine gute Dokumentation durch Metadaten zu achten.

Neben den In-situ-Beobachtungen nehmen die mittels Fernerkundungsverfahren erhobenen Daten (z. B. Satelliten, Radar) auch für klimatologische Anwen-

dungen einen zunehmend breiten Raum ein. Sofern die GCOS-Prinzipien zur Klimaüberwachung mittels Satelliten ausreichend berücksichtigt sind, liefern diese Daten eine Ergänzung und komplementäre Informationen zu den In-situ-Daten. Satellitendaten sind dabei insbesondere geeignet, um räumliche Lücken zu schließen und globale Datensätze abzuleiten (siehe Tabelle 1-1; WMO 2016).

Die Liste der ECVs ist veränderlich. Im Zuge des Fortschrittes bei Klimaforschung und Messtechnik können weitere Klimavariablen in die Liste der ECVs aufgenommen werden. Auch neue Nutzeranforderungen, die z. B. bei der Planung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel entstehen, können zur Modifizierung der Liste der ECVs führen. Die Relevanz der neuen ECVs für Deutschland muss im Zusammenhang mit der Umsetzung des GCOS-Implementierungsplans (WMO 2010, 2016, 2022) koordiniert und abgestimmt werden.

Die Aufdeckung von grundsätzlichen Synergien in den Messnetzen kann zu einer Optimierung der Beobachtungen und einer Verbesserung im Verständnis des gesamten Klimasystems führen. Integrierte Auswertungen mehrerer Klimavariablen können hierzu einen wertvollen Beitrag leisten.

Ein gut funktionierendes nationales Klimabeobachtungssystem ist mithin auch eine der Säulen für die nationale Umsetzung des globalen Rahmenwerks für Klimadienste (Global Framework for Climate Services, GFCS).

8

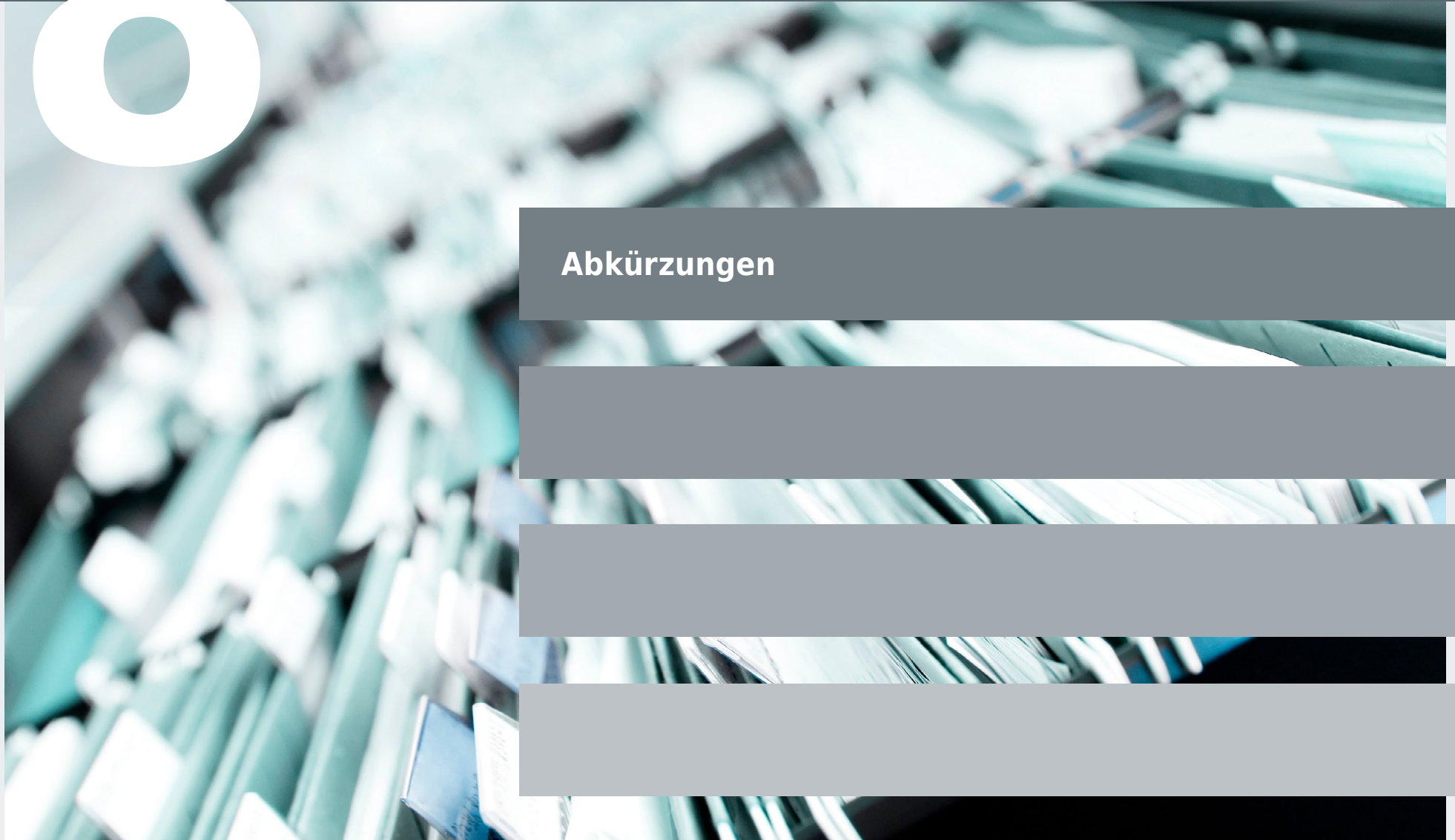
Verzeichnisse



8

Verzeichnisse

Abkürzungen



| | | | |
|---|---|---|---|
| A | | | |
| AABW | AWI | BonaRes | CC0 |
| Antarctic Bottom Water | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie | Creative Commons Zero |
| AAIW | AWZ | BOOS | CEMEMS |
| Antarctic Intermediate Water | Ausschließliche Wirtschaftszone | Baltic Operational Oceanographic System | Custom Embedded MEMS solutions |
| AARI | B | BSH | CEMS |
| Arctic and Antarctic Research Institute | BAdW | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | Copernicus Emergency Management Service |
| Abb. | Bayerische Akademie der Wissenschaften | BSRN | CEOS |
| Abbildung | BATS | Baseline Surface Radiation Network | Committee on Earth Observation Satellites |
| ACP | Bermuda Atlantic Time-series Study | BWI | CGMS |
| Atmospheric Composition Portal | BC | Bundeswaldinventur | Coordination Group for Meteorological Satellites |
| ACTRIS | Black Carbon | BZE | CH ₄ |
| Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure | BCO-DMO | Bodenzustandserhebung | Methan |
| ADCP | Biological and Chemical Oceanography Data Management Office | BZE-LW | CHARM-F |
| Acoustic Doppler Current Profiler | BDF | Bodenzustandserhebung Landwirtschaft | CH ₄ Airborne Remote Monitoring |
| AG | Boden-Dauerbeobachtungsflächen | BZE-Wald | CHL |
| Aktiengesellschaft | BEI | Bodenzustandserhebung im Wald | Chlorophyll |
| AGU | Blaueis | C | CHMI |
| American Geophysical Union | BfG | C | Czech Hydrometeorological Institute |
| ALOMAR | Bundesanstalt für Gewässerkunde | Kohlenstoff | CIIC |
| Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research | BfN | C3S | Climate and Cryosphere Project |
| AMBAY | Bundesamt für Naturschutz | Copernicus Climate Change Service | CLIMAT |
| Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration | BGBI | Caltech | Übermittlungscode für aktuelle monatliche klimatologische Daten |
| AMSeL | Bundesgesetzblatt | California Institute of Technology | ClimDev Africa |
| KFKI-Projekt zur Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste | BGC-Argo | CAMS | Climate for Development in Africa |
| AntarktUmwSchProtAG | Biogeochemical Argo | Copernicus Atmosphere Monitoring Service | CLIVAR |
| Gesetz zur Ausführung des Umweltschutzprotokolls | BGR | C _{ant} | Climate Variability and Predictability |
| AntON | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe | anthropogener Kohlenstoff/anthropogenes Kohlendioxid | CM SAF |
| Antarctic Observing Network | BlmSchV | CARBOCHANGE | Satellite Application Facility on Climate Monitoring |
| AOPC | Bundesimmissionsschutzverordnung | Changes in carbon uptake and emissions by oceans in a changing climate | CMEMS |
| Atmospheric Observation Panel for Climate | BLANO | CarboEurope | Copernicus Marine Service |
| Argo | Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee | Integrated Project CarboEurope-IP, Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance | CMIP |
| Array for Real-time Geostrophic Oceanography | BLE | CARBOOCEAN | Coupled Model Intercomparison Project |
| ATDnet | Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung | Marine carbon sources and sinks assessment | CNES |
| Arrival Time Difference Network des Britischen Wetterdienstes zur Blitzortung | BLIDS | CARIBIC | Centre National d'Etudes Spatiales |
| AtlantOS | Blitz Informationsdienst von Siemens | Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container | CNRS |
| All-Atlantic Ocean Observing System | BMBF | CBD | Centre national de la recherche scientifique |
| AutoPollen | Bundesministerium für Bildung und Forschung | Convention on Biological Diversity | CO ₂ |
| EUMETNET Automatic Pollen Monitoring Programme | BMDV | WMO Commission for Basic Systems (seit 2019 INFCOM) | Kohlendioxid |
| | Bundesministerium für Digitales und Verkehr | | CO2M |
| | BMEI | | Copernicus Carbon Dioxide Monitoring |
| | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft | | COCCON |
| | | | Collaborative Carbon Column Observing Network |
| | | | COMFORT |
| | | | Our common future ocean in the Earth system - quantifying coupled cycles of carbon, |

| | | | |
|--|--|---|---|
| oxygen, and nutrients for determining and achieving safe operating spaces with respect to tipping points | DAS Deutsche Anpassungsstrategie | ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts | EURO4M EUropean Reanalysis and Observations for Monitoring |
| COMPONUT Towards comparability of global oceanic nutrient data | DBCP Data Buoy Cooperation Panel | ECV Essential Climate Variable | EURO-FRIEND European Flow Regimes from International Experimental and Network Data |
| COP Conference of the Parties of the UNFCCC | DCPC Data Collection or Production Centre | EEA European Environment Agency | EuroGOOS European Global Ocean Observing System |
| COPEPOD Coastal & Oceanic Plankton Ecology, Production, & Observation Database | DDC Data Distribution Centre | EFAS European Flood Awareness System | EUROWATERNET The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources |
| Copernicus Erdbeobachtungsprogramm der EU | Destatis Statistisches Bundesamt | EFFIS European Forest Fire Information System | EUSAAR EUropean Supersites for Atmospheric Aerosol Research |
| CORDEX Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment | DFD Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum | EMEP European Monitoring and Evaluation Programme | F |
| COSMO-DE Consortium for Small-Scale Modelling for Germany | DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft | EMODnet European Marine Observation and Data Network | Fach-AG EuNäP Facharbeitsgruppe Eutrophierung, Nährstoffe und Plankton |
| COSMO-EU Consortium for Small-Scale Modelling for Europe | DGJ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch | ENVISAT Environmental Satellite | FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| COSMOS-Europe European network of cosmic-ray neutron soil moisture sensors | DGzRS Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger | EPA Environmental Protection Agency | FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe |
| COST European Cooperation in Science and Technology | DIAL Differential Absorption Lidar | EPN European Phenological Network | FDR Frequency Domain Reflectometry |
| COSYNA Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas | DKRZ Deutsches Klimarechenzentrum | EPS Ensemble Prediction System | FG First Guess Product |
| CRITTERBASE wissenschaftliches Data Warehouse für Meeresbiota | DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt | ERA5 ECMWF Reanalysis v5 | FINO Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee |
| CRNS Cosmic-Ray Neutron Sensing | DOD Deutsches Ozeanographisches Datenzentrum | ESA European Space Agency | FMI Finnisches Meteorologisches Institut |
| CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation | DOI Digital Object Identifier | ESRL Earth System Research Laboratories | FONA Forschung für Nachhaltigkeit |
| CTM Chemistry and Transport Model | DSOW Denmark Strait Overflow Water | ESTOC European Station for Time series in the Ocean, Canary Islands | FS Forschungsschiff |
| CVOO Cape Verde Ocean Observatory | DU Dobson Unit | E-Surfmar EUMETNET Surface Marine observation programme | FTIR Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie |
| D | DUETT Integrierte Nutzung von In-situ- und Satellitendaten | EU Europäische Union | FuE Forschung und Entwicklung |
| D-A-CH Deutschland-Österreich-Schweiz | DWD Deutscher Wetterdienst | EUCLID European Cooperation for Lightning Detection | G |
| DAM Deutsche Allianz Meeresforschung e. V. | DWDG Gesetz über den Deutschen Wetterdienst | EUMETNET Economic Interest Grouping (EIG) of European National Meteorological Services | GAW Global Atmosphere Watch |
| | E | EUMETSAT European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites | GCM Global Climate Model |
| | EAN European Aeroallergen Network | | GCOS Global Climate Observing System |
| | EarthCARE Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer | | |
| | EBAS Database of atmospheric chemical composition and physical properties | | |

| | | | |
|--|--|--|--|
| GCOS-DE GCOS Deutschland | GNSS Global Navigation Satellite System | H ₂ S Schwefelwasserstoff | ICES International Council for the Exploration of the Sea |
| GCP Global Carbon Project | GO ₂ DAT Global Ocean Oxygen Database and Atlas | HELCOM Helsinki Commission | ICOADS International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set |
| GDAC Global Data Assembly Centre | GOME Global Ozone Monitoring Experiment | HGF Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. | ICON ICOsahedral Nonhydrostatic circulation model |
| GDAP GEWEX Data and Analysis Panel | GOOS Global Ocean Observing System | HOAPS Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data | ICON-ART ICOsahedral Nonhydrostatic circulation model - Aerosols and Reactive Trace gases |
| GDI Geodateninfrastruktur | GOSAT Greenhouse Gases Observing Satellite | HOMPRA GPCC Homogenized Precipitation Analysis | ICON-EU ICOsahedral Nonhydrostatic circulation model for Europe |
| GDI-DE Geodateninfrastruktur Deutschland | GO-SHIP Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program | HOT Hawaii Ocean Time-series | ICOS Integrated Carbon Observation System |
| GDP GRUAN Data Product | GPCC Global Precipitation Climatology Centre | hPa Hektopascal | ICP Forests International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests |
| GEO Group on Earth Observations | GPCP Global Precipitation Climatology Project | H ₅ Signifikante Wellenhöhe | IG ³ IS Integrated Global Greenhouse Gas Information System |
| GEOMAR GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | GPS Global Positioning System | H SAF Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management | IGACO Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations |
| GeoNutzV Geodatennutzungsverordnung | GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment | HTF Höllentalferner | IGB Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei |
| GEOSS Global Earth Observation System of Systems | GRDC Global Runoff Data Centre | HWRM-RL Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie | IGJ Internationales Geophysikalisches Jahr |
| GEWEX Global Energy and Water Exchanges | GRUAN GCOS Reference Upper-Air Network | HWRP Hydrology and Water Resources Programme | IGRAC International Groundwater Resources Assessment Centre |
| GFCS Global Framework for Climate Services | GSN GCOS Surface Network | HYDROLARE International Data Centre on the Hydrology of Lakes and Reservoirs | IHP Intergovernmental Hydrological Programme |
| GFMC Global Fire Monitoring Center | GSNMC GCOS Surface Network Monitoring Centre | Hydroweb Datenportal für Zeitreihen der Pegelstände von Flüssen und Seen | IICWG International Ice Charting Working Group |
| GIA glaziale isostatische Anpassung | GTN-H Global Terrestrial Network for Hydrology | | ILTER International Long Term Ecological Research |
| GLD360 Global Lightning Detection Network | GTN-R Global Terrestrial Network for River Discharge | I | INFCOM Commission for Observation, Infrastructure and Information Systems |
| GlobWave Global Wave Data Portal | GTOS Global Terrestrial Observing System | IAGOS In-service Aircraft for a Global Observing System | INSPIRE Infrastructure for Spatial Information in Europe |
| GLODAP Global Ocean Data Analysis Project | GTS Global Telecommunication System | IAHS International Association of Hydrological Sciences | |
| GLOSS Global Sea Level Observing System | GUAN GCOS Upper-Air Network | IAP Institute of Atmospheric Physics | |
| GmbH Gesellschaft mit beschränkter Haftung | GUAN (2.15) German Ultrafine Aerosol Network | ICDR Interim Climate Data Record | |
| GME Global Model Extended | GWRL Grundwasserrichtlinie | | |
| GMSL Global Mean Sea Level | H H ₂ Wasserstoff | | |

| | | | |
|---|--|---|--|
| INSTAAR Institute of Arctic and Alpine Research | K | LUNG Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie | MOZ Mittlere Ortszeit |
| IOC Intergovernmental Oceanographic Commission | K Kelvin | | MP Monitoring Product |
| IOCCG International Ocean-Colour Coordinating Group | kA Kiloampere | M | mPa Millipascal |
| IOCCP International Ocean Carbon Coordination Project | KEG Gruppe Erdmessung und Glaziologie | MAMAP Methane Airborne Mapper | MPI-M Max-Planck-Institut für Meteorologie |
| IODP Integrated Ocean Discovery Program | KFKI Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen | MARNET Marines Umweltmessnetz in Nord- und Ostsee | MQ Mittlerer Abfluss |
| IOW Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde | KIT Karlsruher Institut für Technologie | MARUM Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen | MRI Meteorological Research Institute |
| IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change | KLIDADIGI Klimadatendigitalisierung | MB Massenbilanz | M. S. Maria Sibylla |
| IPG International Phenological Gardens | KNMI Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut | MCAP Monte-Carlo autoregressive padding | MSE mean squared error |
| IPWG International Precipitation Working Group | L | MCDS Marine Climate Data System | MSL Mean Sea Level |
| i. R. im Ruhestand | LAWA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser | MD Meteorologischer Dienst der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik | MSRL Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie |
| IR Infrarot | LfU Bayern Bayerisches Landesamt für Umwelt | MEMENTO MarinE MethanE and NiTrous Oxide | MTG Meteosat Third Generation |
| ISC International Science Council | LfUG Gesetz über das Bayerische Landesamt für Umwelt | MERLIN Methane Remote Sensing Lidar Mission | MUDAB Meeresumweltdatenbank |
| ISF Institut für Seenforschung | Lidar Light Detection And Ranging | Meteosat Meteorological satellite | MUNSTAR Projekt »Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland« |
| ISMN International Soil Moisture Network | LINET Lightning Detection Network | Metop Meteorological Operational Satellite | N |
| ISOW Iceland-Scotland Overflow Water | LKN.SH Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein | MIK Brandenburg Ministerium des Innern und für Kommunales des Landes Brandenburg | N ₂ O Distickstoffmonoxid/Lachgas |
| ITMS Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem | LLCF Long-lived climate forcers | ML Niedersachsen Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz | NADW North Atlantic Deep Water |
| IUP Institut für Umweltphysik, Universität Bremen | LLUR Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume | MOHp Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg | NASA National Aeronautics and Space Administration |
| J | LMU München Ludwig-Maximilians-Universität München | MOL Meteorologisches Observatorium Lindenberg | NDACC Network for the Detection of Atmospheric Composition Change |
| JCOMM Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology | LSA SAF Satellite Application Facility on Land Surface Analysis | MOL-RAO Meteorologisches Observatorium Lindenberg - Richard-Aßmann-Observatorium | NDMC Network for the Detection of Mesospheric Change |
| JGOFS Joint Global Ocean Flux Study | LSW Labrador Sea Water | MoMoK Moorbodenmonitoring für den Klimaschutz | NEMO Nucleus for European Modelling of the Ocean |
| JJA Juni, Juli, August | LT Leuchtturm | MOSAIC Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate | NF ₃ Stickstofftrifluorid |
| JMA Japan Meteorological Agency | LUCAS Land Use and Coverage Area frame Survey | | NILU Norsk institutt for luftforskning |

| | | | |
|--|---|--|---|
| NIMH National Institute of Meteorology and Hydrology | OECD Organisation for Economic Co-operation and Development | Q Q Abfluss | SCAPP SCAnning Pyrhelimeter/Pyranometer |
| NIR National Inventory Report | OSI SAF Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice | R RA Regional Association | SCIAMACHY SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CartographY |
| NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz | OSPAR Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks, das die Oslo- und Paris-Übereinkommen ersetzt; auch Name der entsprechenden internationalen Kommission | Radar Radio Detection And Ranging | SC-MINT Standing Committee on Measurements, Instrumentation and Traceability |
| NMFS National Marine Fisheries Service | | RADOLAN Radar-Online-Aneichung | SCOR Scientific Committee on Oceanic Research |
| NMHS National Meteorological and Hydrological Service | P P ₉₅ 95. Perzentil | RBCN Regional Basic Climatological Network | SCOR COMPONUT SCOR Working Group 147 »Towards comparability of global oceanic nutrient data« |
| NO Stickstoffmonoxid | PANGAEA® Data Publisher for Earth & Environmental Science | RCA4 Rossby Centre regional atmospheric mode, fourth version | SeaDataNet Pan-European infrastructure for ocean & marine data management |
| NO ₂ Stickstoffdioxid | PDO Pacific Decadal Oscillation | RCC-CM Regional Climate Centre Network Node on Climate Monitoring | SeeAufgG Gesetz über die Aufgaben des Bundes auf dem Gebiet der Seeschifffahrt |
| NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration | PEG Phytoplankton Expert Group | RCP Representative Concentration Pathway | SEVIRI Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager |
| NODC National Oceanographic Data Center | PEP Pan European Phenology database | ReKliEs-De Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland | SF ₆ Schwefelhexafluorid |
| NOOS North West European Shelf Operational Oceanographic System | PermaNET Permafrost Long-term Monitoring Network | REMO-UBA Regionales Klimamodell - Umweltbundesamt | SI Système international d'unités |
| NO _x Stickstoffoxide | PermaNET-BY PermaNET Bayerische Alpen | RM Referenzmaterial | SMHI Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut |
| NPGO North Pacific Gyre Oscillation | PID Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst | RMI Royal Meteorological Institute of Belgium | SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity |
| NSF Nördlicher Schneeferner | PM2,5 Particulate Matter 2,5 µm | RMSL Relative Mean Sea Level | SO ₂ Schwefeldioxid |
| NSIDC National Snow and Ice Data Center | PM10 Particulate Matter 10 µm | ROOS Regional Operational Oceanographic Systems | SOCAT Surface Ocean CO ₂ Atlas |
| NSSS North Sea Summer Survey | PNP Pegelnullpunkt | RS Radiosonde | SONie Instrument zur Messung der Sonnenscheindauer |
| O | ppb parts per billion (Faktor 10 ⁻⁹) | S S5P/S5 Sentinel-5P/Sentinel-5 | SOOP Ship Of Opportunity Programme |
| OC Ocean Colour | ppm parts per million (Faktor 10 ⁻⁶) | SAF Satellite Application Facility | SOT Ship Observations Team |
| OC TAC Ocean Colour Thematic Assembly Center | ppt parts per trillion (Faktor 10 ⁻¹²) | SAR Synthetic Aperture Radar | SPNAtl subpolarer Nordatlantik |
| OceanGLIDERS GCOS-Komponente zur Erfassung globaler Beobachtungsdaten von Ozeangleitern | PSM Pflanzenschutzmittel | SARAH Surface Radiation Data Set - Heliosat | SSA singular system analysis |
| OceanSITES weltweites System von Tiefsee-Referenzstationen | PSS-78 Practical Salinity Scale 1978 | SBSTA Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice | SSF Südlicher Schneeferner |
| OCO Orbiting Carbon Observatory | PW Precipitable Water | | |

SURFRAD

Surface Radiation Budget

Sv

Sverdrup

SWOT

Surface Water and Ocean Topography

SynopZahlenschlüssel zur Übermittlung von
Wetterbeobachtungen**T****TCCON**

Total Carbon Column Observing Network

TCDR

Thematic Climate Data Records

TD

Technical Document

TDR

Time Domain Reflectometry

TERENO

Terrestrial Environmental Observatories

THG

Treibhausgas

TI

Thünen-Institut

TROPOS

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung

TU

Technische Universität

U**UBA**

Umweltbundesamt

UFP

Ultrafine Particles

UFS

Umweltforschungsstation Schneefernerhaus

UIG

Umweltinformationsgesetz

UK Met Office

United Kingdom Meteorological Office

UNECEUnited Nations Economic Commission for
Europe**UNEP**

United Nations Environment Programme

UNESCOUnited Nations Educational, Scientific and
Cultural Organization**UNFCCC**United Nations Framework Convention on
Climate Change**US**

United States

USA

United States of America

UTC

Universal Time Coordinated

UV

Ultraviolett

V**VASCLimO**Variability Analysis of Surface Climate
Observations**VF**

Vernagtferner

VIIRIS

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

VOS

Voluntary Observing Ships

VWFSVermessungs-, Wracksuch- und
Forschungsschiff**W****WaStrG**

Bundeswasserstraßengesetz

WCC

World Climate Conference

WCP

World Climate Programme

WCRP

World Climate Research Programme

WDC

World Data Center

WDCC

World Data Center for Climate

WDCGG

World Data Centre for Greenhouse Gases

WDC-MAREWorld Data Center for Marine Environmental
Sciences**WDC-RSAT**World Data Center for Remote Sensing of the
Atmosphere**WDS**

World Data System

WG125Working Group 125 on Global Comparisons of
Zooplankton Time Series**WGMS**

World Glacier Monitoring Service

WGPMEWorking Group on Phytoplankton and
Microbial Ecology**WGZE**

Working Group on Zooplankton Ecology

WHG

Wasserhaushaltsgesetz

WHYMAPWorld-wide Hydrogeological Mapping and
Assessment Programme**WIGOS**

WMO Integrated Global Observing System

WIS

WMO Information System

WISE

Water Information System for Europe

WMG

Watzmanngletscher

WMO

World Meteorological Organization

WMO RA VIWMO Regional Association VI (Europe and
Middle East)**WOCE**

World Ocean Circulation Experiment

WRDC

World Radiation Data Centre

WRMC

World Radiation Monitoring Center

WRRL

Wasserrahmenrichtlinie

WSA

Wasser- und Schifffahrtsamt

WSVWasser- und Schifffahrtsverwaltung des
Bundes**WW**

Wasserwert

WWLLN

World Wide Lightning Location Network

WZN

Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie

Z**ZALF**Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts-
forschung (ZALF) e. V.**ZAMF**Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung
Braunschweig**ZAMG**Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik**ZMMF**Zentrum für Medizin-Meteorologische
Forschung

8

Verzeichnisse



[Redacted text block]

Fotos

[Redacted text block]

[Redacted text block]

| Foto | Quelle |
|-----------------|--|
| Titel | Christian Rohleder/DWD |
| Vorwort | Sandra Steins/Bundesregierung |
| Zusammenfassung | Claudia Hinz/DWD |
| 1-1 | Claudia Hinz/DWD |
| 2.5-1 | MOL/DWD |
| 2.5-2 | MOL/DWD |
| 2.5-3 | MOL/DWD |
| 2.7-1 | MOL/DWD |
| 2.9-1 | Gerhard Lux/DWD |
| 2.10-1 | Michael Elsasser/UBA |
| 2.10-2 | Michael Elsasser/UBA |
| 2.11-1 | Jacobkhed, Caltech LRbuilding TCCON dome, CC BY-SA 4.0 |
| 2.12-1 | Hannes Vogelmann/KIT |
| 2.12-2 | UFS GmbH |
| 2.14-1 | DWD |
| 2.16-1 | Franz Peischl/Pixabay.com |
| 2.16-2 | stadelpeter/stock.adobe.com |
| 2.16-3 | Christina Endler/DWD |
| 3.0-1 | Daniel Madsen/Alphafilm |
| 3.1-1 | Johannes Karstensen/GEOMAR |
| 3.1-2 | Sören Janssen/Reederei Briese |
| 3.2-1 | Mario Müller/GEOMAR |
| 3.2-2 | Katrin Latarius/BSH |
| 3.2-3 | Kerstin Jochumsen/BSH |
| 3.5-1 | BSH |
| 3.5-2 | BSH |
| 3.8-1 | Arne Körtzinger/GEOMAR |
| 3.9-1 | Julia Wenzel |
| 3.10-1 | Holger Klein/BSH |

| Foto | Quelle |
|--------|--|
| 3.13-1 | Arne Körtzinger/GEOMAR |
| 3.13-2 | Arne Körtzinger/GEOMAR |
| 3.13-3 | Arne Körtzinger/GEOMAR |
| 3.14-1 | GEOMAR |
| 3.15-1 | IUP |
| 3.16-1 | Helena Hauss (linker Bildteil) und Annegret Stuhr (rechter Bildteil)/ beide GEOMAR |
| 3.16-2 | Holger Haslob/Thünen-Institut für Seefischerei |
| 3.17-1 | Wolf Wichmann |
| 3.17-2 | Tobias Dolch/AWI |
| 4.1-1 | Heinz Engel/BfG |
| 4.1-2 | Uwe Nicodemus/BfG |
| 4.1-3 | Jens Wilhelmi/BfG |
| 4.4-1 | Ingenieurbüro für Wasser, Boden und Umweltschutz (wbu) |
| 4.4-2 | IGB |
| 4.6-1 | Wilfried Hagg/LMU München |
| 4.6-2 | Astrid Lambrecht |
| 4.9-1 | TI |
| 4.10-1 | MIK Brandenburg; Inset: ML Niedersachsen |
| 5.3-1 | WRMC |
| 5.4-1 | DKRZ |
| 5.4-2 | DKRZ |
| 5.4-3 | DKRZ |
| 5.7-1 | Holger Vömel, Franz Immler/DWD |
| 5.8-1 | EUMETSAT |
| 6.1-1 | Holger Schmithüsen/AWI |
| 6.2-1 | BAdW, geo.badw.de |
| 6.2-2 | Astrid Lambrecht |

| Schmuckfoto auf Seite | Quelle |
|-------------------------|--------------------------------------|
| 6, 7 | mirkomedia/fotolia.com |
| 11 | Jürgen Kottmann/stock.adobe.com |
| 12, 13, 29, 32, 37 | Frederike Egerer |
| 14 | Constantin Eichel; Corney/fc-foto.de |
| 16 | filius/fotolia.com |
| 18 | Galyna Andrushko/fotolia.com |
| 20 | Creative Collection (ccvision.de) |
| 27 | Anton Petrus/fotolia.com |
| 36 | Claudia Hinz/DWD |
| 38 | Andreas Fitz/123rf.com |
| 41 | Dudarev Mikhail/fotolia.com |
| 44 | Fel1ks/fotolia.com |
| 50 | Creative Collection (ccvision.de) |
| 53 | Martin Muránsky/panthermedia.net |
| 55 | ssuaphoto/panthermedia.net |
| 59, 60, 63, 88, 104 | Iakov Filimonov/panthermedia.net |
| 70 | Paul Stock/fotolia.com |
| 73 | Birgit Klein/BSH |
| 79 | Frank Sakuth/BSH |
| 82 | vmakt/fotolia.com |
| 91 | Holger Klein/BSH |
| 93 | Thomas Kreuz/BSH |
| 110, 111, 123, 129, 139 | Igor Stepovik/fotolia.com |
| 115 | suze/photocase.com |
| 117 | pixabay/3345408 |
| 118 | daniel.schoenen/photocase.com |
| 124 | pollux/fotolia.com |
| 130 | Jörg Rapp/DWD |
| 132 | Christian Stoll/fotolia.com |

| Schmuckfoto auf Seite | Quelle |
|-------------------------|--------------------------------------|
| 141 | Undine Aust/fotolia.com |
| 143, 154 | Viktoriya Sukhanova/fotolia.com |
| 144 | Pauline Borgmann |
| 146 | Thorsten Schier/fotolia.com |
| 153 | EUMETSAT |
| 160 | Stefan Christmann/AWI, CC BY 4.0 |
| 165 | Claudia Hinz/DWD |
| 172, 173, 180, 183, 186 | Ioana Davies (Drutu)/stock.adobe.com |

8

Verzeichnisse



Autorinnen und Autoren

| Name | Institution/Unternehmen | Beitrag |
|-------------------------------------|--|------------------------|
| Abel, Ina | Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz | 4.10 |
| Andersson, Axel | Deutscher Wetterdienst | 2.4, 5.7 |
| Arévalo-Martínez, Damian L. | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.14 |
| Becker, Andreas | Deutscher Wetterdienst | 2.4 |
| Belz, Jörg Uwe | Bundesanstalt für Gewässerkunde | 4.1 |
| Bernoville, Séverine | World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere | 5.5 |
| Bittig, Henry | Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde | 3.12 |
| Bittner, Michael | World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere | 5.5 |
| Böttcher, Christopher | Deutscher Wetterdienst | 4.10 |
| Bovensmann, Heinrich | Universität Bremen, Institut für Umweltphysik | 2.13 |
| Brändlein, Dirk | nowcast GmbH | 2.9 |
| Breyer, Juliane | Deutscher Wetterdienst | 4.12 |
| Couret, Cedric | Umweltbundesamt | 2.10, 2.11, 2.12, 2.15 |
| Dauert, Ute | Umweltbundesamt | 2.14 |
| Deepen, Jan | Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern | 4.4 |
| Dirksen, Ruud | Deutscher Wetterdienst | 2.7, 5.7 |
| Dominik, Rainer | Vaisala GmbH | 2.9 |
| Driemel, Amelie | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | 5.3 |
| Ebner von Eschenbach, Anna-Dorothea | Bundesanstalt für Gewässerkunde | 4.2 |
| Elsasser, Michael | Umweltbundesamt | 2.10, 2.11, 2.12, 2.15 |
| Endler, Christina | Deutscher Wetterdienst | 2.16 |
| Felden, Janine | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | 5.6 |

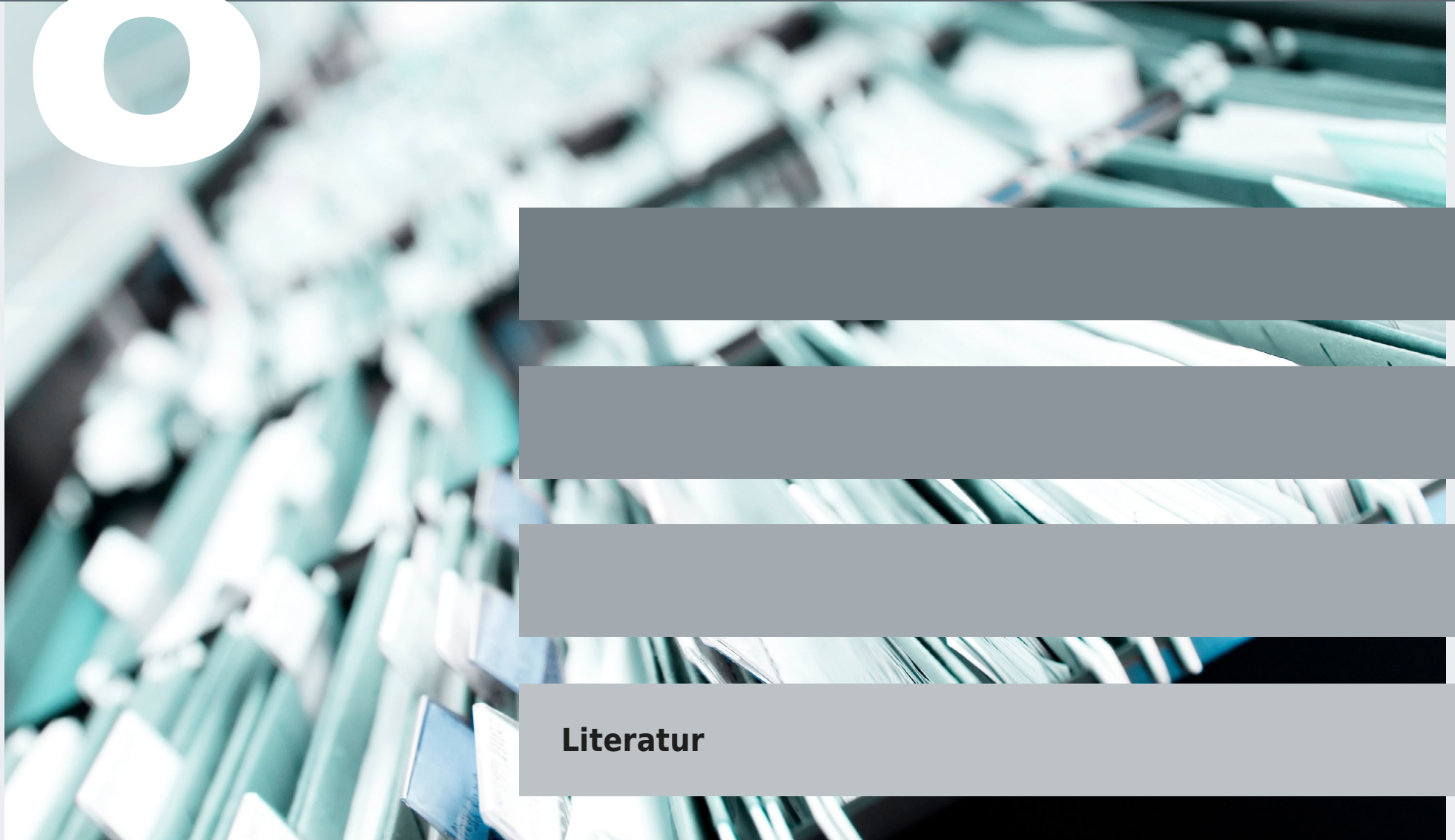
| Name | Institution/Unternehmen | Beitrag |
|------------------------|--|------------------------------------|
| Finger, Peter | Deutscher Wetterdienst | 2.4 |
| Friedrich, Karsten | Deutscher Wetterdienst | 2.9 |
| Gilge, Stefan | Deutscher Wetterdienst | 2.16 |
| Glöckner, Frank Oliver | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)/ Universität Bremen, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften | 5.6 |
| Görsdorf, Ulrich | Deutscher Wetterdienst | 2.8 |
| Grüneberg, Erik | Thünen-Institut für Waldökosysteme | 4.8 |
| Hanke, Thomas | Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz | 4.10 |
| Hauss, Helena | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.16 |
| Hellack, Bryan | Umweltbundesamt | 2.10, 2.11, 2.12, 2.15 |
| Herbst, Mathias | Deutscher Wetterdienst | 4.11 |
| Holfort, Jürgen | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.6 |
| Hollmann, Rainer | Deutscher Wetterdienst | 5.8 |
| Jochumsen, Kerstin | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.0 |
| Junghänel, Thomas | Deutscher Wetterdienst | 2.4 |
| Kaiser-Weiss, Andrea | Deutscher Wetterdienst | 2.13 |
| Karstensen, Johannes | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.0, 3.2, 3.3, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11 |
| Kaspar, Frank | Deutscher Wetterdienst | 2.1, 2.2, 2.3, 2.6, 2.9, 4.5 |
| Klein, Birgit | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.0, 3.2, 3.4, 3.7 |
| Klein, Holger (i. R.) | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.10 |
| Kleta, Henry | Deutscher Wetterdienst | 3.8, 3.9 |
| Kock, Annette | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.14 |
| Kohlhas, Eckhard | Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern | 4.3, 4.4 |

| Name | Institution/Unternehmen | Beitrag |
|-----------------------|---|------------------------|
| Körtzinger, Arne | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.13 |
| Kothe, Steffen | Deutscher Wetterdienst | 5.8 |
| Kraberg, Alexandra | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | 3.17 |
| Lammert, Andrea | Deutsches Klimarechenzentrum | 5.4 |
| Lanconelli, Christian | Unisystems SA c/o, EC Joint Research Centre | 5.3 |
| Latarius, Katrin | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.7 |
| Looser, Ulrich | Bundesanstalt für Gewässerkunde/ Global Runoff Data Centre | 5.2 |
| Mayer, Christoph | Bayerische Akademie der Wissenschaften, Erdmessung und Glaziologie | 4.6, 6.2 |
| Möller, Jens | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.4 |
| Müller, Richard | Deutscher Wetterdienst | 4.7 |
| Naumann, Michael | Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde | 3.12 |
| Pfeifroth, Uwe | Deutscher Wetterdienst | 4.7 |
| Reißmann, Jan Hinrich | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.1 |
| Rhein, Monika | Universität Bremen, Institut für Umweltphysik | 3.15 |
| Riedel, Thomas | Thünen-Institut für Waldökosysteme | 4.9 |
| Riihimaki, Laura | NOAA Global Monitoring Laboratory G-RAD | 5.3 |
| Rosenke, Friedhelm † | Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport | 4.10 |
| Rüdiger, Julian | Umweltbundesamt | 2.10, 2.11, 2.12, 2.15 |
| Schlundt, Michael | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.8 |
| Schmithüsen, Holger | Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) | 6.1 |
| Schneider, Udo | Deutscher Wetterdienst | 5.1 |

| Name | Institution/Unternehmen | Beitrag |
|------------------------------|--|---------|
| Schrader, Dieter (i. R.) | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.5 |
| Schrobitz, Karsten | Deutscher Wetterdienst | 2.7 |
| Schröder, Marc | Deutscher Wetterdienst | 5.8 |
| Schulte, Sven | Umweltbundesamt | 2.14 |
| Schulz, Oliver | Statistisches Bundesamt | 4.2 |
| Senet, Christian | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.5 |
| Stammer, Detlef | Universität Hamburg, Institut für Meereskunde | 3.4 |
| Steinbrecht, Wolfgang | Deutscher Wetterdienst | 2.14 |
| Steinfeldt, Reiner | Universität Bremen, Institut für Umweltphysik | 3.15 |
| Supper-Nilges, Daniela | Bundesanstalt für Gewässerkunde | 4.1 |
| Tanhua, Toste | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel | 3.11 |
| Thern, Stephan | Siemens AG | 2.9 |
| Tinz, Birger | Deutscher Wetterdienst | 2.2 |
| Toussaint, Frank (i. R.) | Deutsches Klimarechenzentrum | 5.4 |
| Uhlmann, Astrid | Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung | 4.10 |
| Wacker, Stefan | Deutscher Wetterdienst | 2.5 |
| Walawender, Ewelina | Deutscher Wetterdienst | 2.4 |
| Wegehenkel, Martin (i. R.) | Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. | 4.11 |
| Weigl, Elmar | Deutscher Wetterdienst | 2.4 |
| Wellbrock, Nicole | Thünen-Institut für Waldökosysteme | 4.8 |
| Wilms, Mayumi | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie | 3.5 |
| Wittich, Klaus-Peter (i. R.) | Deutscher Wetterdienst | 4.10 |
| Zimmermann, Kirsten | Deutscher Wetterdienst | 4.12 |

8

Verzeichnisse



Literatur

- Augustin, J., Sauerborn, R., Burkart, K., Endlicher, W., Jochner, S., Koppe, C., Menzel, A., Mücke, H.-G., Herrmann, A., 2017: Gesundheit. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. *Springer Spektrum*, Berlin, Heidelberg, 137-149, DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3_14.
- Augustine, J.A., Hodges, G.B., 2021: Variability of surface radiation budget components over the U.S. from 1996 to 2019 – Has Brightening Ceased? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **126**, 7, e2020JD033590, DOI: 10.1029/2020JD033590.
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S.B., Montzka, C., Vereecken, H., Tuller, M., 2019: Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics* **57**, 2, 530-616, DOI: 10.1029/2018RG000618.
- Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Landa, C.S. et al., 2016: A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data* **8**, 2, 383-413, DOI: 10.5194/essd-8-383-2016.
- Benninga, H.-J.F., van der Velde, R., Su, Z., 2020: Sentinel-1 soil moisture content and its uncertainty over sparsely vegetated fields. *Journal of Hydrology X* **9**, 100066, DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100066.
- Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dziejewicz, Z., Konarski, J., 2009: LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric research* **91**, 2-4, 564-573, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.06.012.
- Beyrich, F., Lepsic, J.P., Mauder, M., Bange, J., Foken, Th., Huneke, S., Lohse, H., Lüdi, A., Meijninger, W. M. L., Mironov, D., Weissensee, U., Zittel, P., 2006: Area-averaged surface fluxes over the LITFASS-region based on Eddy-Covariance Measurements. *Boundary-Layer Meteorology* **121**, 1, 33-65, DOI: 10.1007/s10546-006-9052-x.
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Schilling, B., Weuthen, A., Vereecken, H., 2017: Effective calibration of low-cost soil water content sensors. *Sensors* **17**, 1, 208, DOI: 10.3390/s17010208.
- Bogena, H.R., Schrön, M., Jakobi, J. et al., 2022: COSMOS-Europe: a European network of cosmic-ray neutron soil moisture sensors. *Earth System Science Data* **14**, 3, 1125-1151, DOI: 10.5194/essd-14-1125-2022.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2021: Geoportal der BfG. Abruf am: 18.10.2021, URL: <https://geoportal.bafg.de/ggina-portal>.
- Bundesregierung, 2002: Third Report by the Government of the Federal Republic of Germany in accordance with the Framework Convention of the United Nations. Abruf am 28.04.2023, URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/gernc3%20Germany.pdf>.
- Bundesregierung, 2023: Eighth National Communication and fifth Biennial Report of the Federal Republic of Germany under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Abruf am 28.04.2023, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8th%20National%20Communication_5th%20BR%20Germany.pdf.
- Bundesverfassungsgericht, 2021: Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich. Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021. Beschluss vom 24. März 2021 - 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://www.bundesverfassungsgericht.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>.
- Copernicus, 2019: European State of the Climate 2019. Greenhouse gas fluxes. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/greenhouse-gas-fluxes>.
- Cunze S., Leiblein, M.C., Tackenberg, O., 2013: Range Expansion of *Ambrosia artemisiifolia* in Europe Is Promoted by Climate Change. *International Scholarly Research Notices Ecology* **2013**, 610126, DOI: 10.1155/2013/610126.
- Deutscher Wetterdienst, 2021: Klimareport Hamburg. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 56 pp.
- Dieterich, C., Wang, S., Schimanke, S., Gröger, M., Klein, B., Hordoir, R., Samuelsson, P., Liu, Y., Axell, L., Höglund, A., Meier, H.E.M., 2019: Surface Heat Budget over the North Sea in Climate Change Simulations. *Atmosphere* **10**, 5, 272, DOI: 10.3390/atmos10050272.
- EPA United States Environmental Protection Agency, 2021: Climate Change Indicators: Ocean Heat. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://www.epa.gov/climate-indicators>.
- Feistel, S., Feistel, R., Nehring, D., Matthäus, W., Nausch G., Naumann, M., 2016: Hypoxic and anoxic regions in the Baltic Sea, 1969 - 2015. *Meereswissenschaftliche Berichte* 100. Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Warnemünde, 85 pp, DOI: 10.12754/msr-2016-0100.
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M. et al., 2021: Global Carbon Budget 2021, DOI: 10.5194/essd-2021-386.
- Govaerts, Y.M., Lattanzio, A., Taberner, M., Pinty, B., 2008: Generating global surface albedo products from multiple geostationary satellites. *Remote Sensing of Environment* **112**, 6, 2804-2816, DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.012.
- Grüneberg, E., Ziche, D., Wellbrock, N., 2014: Organic carbon stocks and sequestration rates of forests soils in Germany. *Global change Biology* **20**, 8, 2644-2662, DOI: 10.1111/gcb.12558.
- Haigh, I.D., Nicholls, R.J., Wells, N.C., 2009: Mean sea-level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context. *Continental Shelf Research* **29**, 2083-2098, DOI: 10.1016/j.csr.2009.07.013.
- Hannak, L., Brinckmann, S., 2020: Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen: Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **253**. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 101 pp.
- Hannak, L., Friedrich, K., Imbery, F., Kaspar, F., 2019: Comparison of manual and automatic daily sunshine duration measurements at German climate reference stations. *Advances in Science and Research* **16**, 175-183, DOI: 10.5194/asr-16-175-2019.
- IOCCG International Ocean-Colour Coordinating Group, 2022: Missions & Instruments. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://ioccg.org/resources/missions-instruments>.
- IPCC, 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich, 365 pp.
- Jacobs, A., Flessa, H., Don, A. et al., 2018: Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. *Thünen Report* **64**. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 316 pp, DOI: 10.3220/REP1542818391000.
- Jakobi, J., Huisman, J.A., Vereecken, H., Diekkrüger, B., Bogena, H.R., 2018: Cosmic Ray Neutron Sensing for Simultaneous Soil Water Content and Biomass Quantification in Drought Conditions. *Water Resources Research* **54**, 10, 7383-7402, DOI: 10.1029/2018WR022692.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000: The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* **10**, 2, 423-436.
- Johnson, G.C., Lumpkin, R. (Hrsg.), 2021: Global Oceans. In: State of the Climate in 2020. American Meteorological Society (Hrsg.), *Bulletin of the American Meteorological Society* **102**, 8, S143-S198, DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0083.1.
- Kaminski, U., Glod, T., 2011: Are there changes in Germany regarding the start of the pollen season, the season length and the pollen concentration of the most important allergenic pollens? *Meteorologische Zeitschrift* **20**, 5, 497-507, DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0297.
- Karl, T.R., Derr, V.E., Easterling, D.R., Folland, C.K., Hofmann, D.J., Levitus, S., Nicholls, N., Parker, D.E., Withee, G.W., 1995: Critical issues for long-term climate monitoring. *Climatic Change* **31**, 185-221, DOI: 10.1007/BF01095146.
- Kaspar, F., Hannak, L., Schreiber, K.-J., 2016: Climate reference stations in Germany: Status, parallel measurements and homogeneity of temperature time series. *Advances in Science and Research* **13**, 163-171, DOI: 10.5194/asr-13-163-2016.
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., Deutschländer, T., 2013: Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research* **10**, 1, 99-106, DOI: 10.5194/asr-10-99-2013.

- Kaspar, F., Niermann, D., Borsche, M., Fiedler, S., Keller, J., Potthast, R., Rösch, T., Spanghel, T., Tinz, B., 2020: Regional atmospheric reanalysis activities at Deutscher Wetterdienst: review of evaluation results and application examples with a focus on renewable energy. *Advances in Science and Research* **17**, 115–128, DOI: 10.5194/asr-17-115-2020.
- Kaspar, F., Tinz, B., Mächel, H., Gates, L., 2015: Data rescue of national and international meteorological observations at Deutscher Wetterdienst. *Advances in Science and Research* **12**, 1, 57–61, DOI: 10.5194/asr-12-57-2015.
- Kaspar, F., Zimmermann, K., Polte-Rudolf, C., 2014: An overview of the phenological observation network and the phenological database of Germany's national meteorological service (Deutscher Wetterdienst). *Advances in Science and Research* **11**, 1, 93–99, DOI: 10.5194/asr-11-93-2014.
- Key, R.M., Olsen, A., van Heuven, S. et al., 2015: Global Ocean Data Analysis Project, Version 2 (GLODAPv2), ORNL/CDIAC-162, NDP-093. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, Vereinigte Staaten, DOI: 10.3334/CDIAC/OTG.NDP093_GLODAPv2.
- Kniebusch, M., Meier, H.E.M., Neumann, T., Börgel, F., 2019: Temperature variability of the Baltic Sea since 1850 and attribution to atmospheric forcing variables. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **124**, 6, 4168–4187, DOI: 10.1029/2018JC013948.
- Koyama C.N., Korres W., Fiener P., Schneider, K., 2010: Variability of Surface Soil Moisture Observed from Multitemporal C-band SAR and Field Data. *Vadose Zone Journal* **9**, 4, 1014–1024, DOI: 10.2136/vzj2009.0165.
- Kuttler, W., 2011: Climate change in urban areas, Part 1, Effects. *Environmental Sciences Europe* **23**, 1, 11, DOI: 10.1186/2190-4715-23-11.
- Lake, I.R., Jones, N.R., Agnew, M., Goodess, C.M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., Semenov, M.A., Solomon, F., Storkey, J., Vautard, R., Epstein, M.M., 2017: Climate Change and Future Pollen Allergy in Europe. *Environmental Health Perspectives* **125**, 3, 385–391, DOI: 10.1289/EHP173.
- Lauvset, S.K., Key, R.M., Olsen, A. et al., 2016: A new global interior ocean mapped climatology: the 1°×1° GLODAP version 2. *Earth System Science Data* **8**, 2, 325–340, DOI: 10.5194/essd-8-325-2016.
- Lauvset, S.K., Lange, N., Tanhua, T. et al., 2021: An updated version of the global interior ocean biogeochemical data product, GLODAPv2.2021. *Earth System Science Data* **13**, 12, 5565–5589, DOI: 10.5194/essd-13-5565-2021.
- Lehmann, A., Getzlaff, K., Harlaß, J., 2011: Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958–2009. *Climate Research* **46**, 2, 185–196, DOI: 10.3354/cr00876.
- Lennartz, S.T., Lehmann, A., Herrford, J., Malien, F., Hansen, H.-P., Biester, H., Bange, H. W., 2014: Long-term trends at the Boknis Eck time series station (Baltic Sea), 1957–2013: does climate change counteract the decline in eutrophication? *Biogeosciences* **11**, 22, 6323–6339, DOI: 10.5194/bg-11-6323-2014.
- Llovel, W., Purkey, S., Meyssignac, B., Blazquez, A., Kolodziejczyk, N., Bamber, J., 2019: Global ocean freshening, ocean mass increase and global mean sea level rise over 2005–2015. *Scientific Reports* **9**, 1, 17717, DOI: 10.1038/s41598-019-54239-2.
- Löwe, P. (Hrsg.), 2009: System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. *Berichte des BSH* **44**, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 270 pp.
- Ma, X., Lennartz, S.T., Bange, H.W., 2019: A multi-year observation of nitrous oxide at the Boknis Eck Time Series Station in the Eckernförde Bay (southwestern Baltic Sea). *Biogeosciences* **16**, 20, 4097–4111, DOI: 10.5194/bg-16-4097-2019.
- Mayer, C., Weber, M., Wendt, A., Hagg, W., 2021: Die bayerischen Gletscher, die verbliebenen Eisreserven Deutschlands. *Polarforschung* **89**, 1, 7, DOI: 10.5194/polp-89-1-2021.
- Montzka, C., Bogena, H.R., Zreda, M., Moneris, A., Morrison, R., Muddu, S., Vereecken, H., 2017: Validation of Spaceborne and Modelled Surface Soil Moisture Products with Cosmic-Ray Neutron Probes. *Remote Sensing* **9**, 2, 103, DOI: 10.3390/rs9020103.
- Mueller, R., Trentmann, J., Träger-Chatterjee, C., Posselt, R., Stöckli, R., 2011: The Role of the Effective Cloud Albedo for Climate Monitoring and Analysis. *Remote Sensing* **3**, 11, 2305–2320, DOI: 10.3390/rs3112305.
- Nasta, P., Bogena, H.R., Sica, B., Weuthen, A., Vereecken, H., Romano, N., 2020: Integrating Invasive and Non-invasive Monitoring Sensors to Detect Field-Scale Soil Hydrological Behavior. *Frontiers in Water* **2**, 26, DOI: 10.3389/frwa.2020.00026.
- National Marine Fisheries Service, 2022: Species Presence Plots. A figure layout created for the ICES WGPME working group. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/de-30201/html/zoom-speciesbox.html>.
- Nguyen, H.H., Jeong, J., Choi, M., 2019: Extension of cosmic-ray neutron probe measurement depth for improving field scale root-zone soil moisture estimation by coupling with representative in-situ sensors. *Journal of Hydrology* **571**, 679–696, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.018.
- OceanOps, 2021: Integrated information, maps and tools to help coordinate and monitor global ocean observation efforts. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://www.ocean-ops.org/board>.
- Pessi, A.T., Businger, S., Cummins, K.L., Demetriadis, N.W.S., Murphy, M., Pifer, B., 2009: Development of a Long-Range Lightning Detection Network for the Pacific: Construction, Calibration, and Performance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **26**, 2, 145–166, DOI: 10.1175/2008JTECHA1132.1.
- Pohjola, H., Mäkelä, A., 2013: The comparison of GLD360 and EUCLID lightning location systems in Europe. *Atmospheric Research* **123**, 117–128, DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.10.019.
- Quante, M., Colijn, F. (Hrsg.), 2016: North Sea Region Climate Change Assessment. Regional Climate Studies, *Springer International Publishing*, Basel, Schweiz, DOI: 10.1007/978-3-319-39745-0.
- Said, R.K., Cohen, M.B., Inan, U.S., 2013: Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**, 13, 6905–6915, DOI: 10.1002/jgrd.50508.
- Said, R., Murphy, M., 2016: GLD360 Upgrade: Performance Analysis and Applications. 24th International Lightning Detection Conference and 6th International Lightning Meteorology Conference, 18.–21. April 2016, San Diego, Kalifornien, Vereinigte Staaten. Abruf am 28.04.2023, URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Ryan%20Said%20and%20Martin%20Murphy.%20GLD360%20Upgrade%20Performance%20Analysis%20and%20Applications.pdf>.
- Schiermeier, Q., 2020: Global methane levels soar to record high. *Springer Nature*, DOI: 10.1038/d41586-020-02116-8.
- Seiz, G., Foppa, N., 2007: Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz). MeteoSchweiz, Zürich und ProClim, Bern, Schweiz, 92 pp.
- Siegel, H., Gerth, M., 2019: Sea Surface Temperature in the Baltic Sea in 2018. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets 2019. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/07/BSEFS-Sea-Surface-Temperature-in-the-Baltic-Sea-2018.pdf>.
- Smith, S.R., Alory, G., Andersson, A. et al., 2019: Ship-Based Contributions to Global Ocean, Weather, and Climate Observing Systems. *Frontiers in Marine Science* **6**, DOI: 10.3389/fmars.2019.00434.
- Stramma, L., Schmidtko, S., Bograd, S.J., Ono, T., Ross, T., Sasano, D., Whitney, F.A., 2020: Trends and decadal oscillations of oxygen and nutrients at 50 to 300 m depth in the equatorial and North Pacific. *Biogeosciences* **17**, 3, 813–831, DOI: 10.5194/bg-17-813-2020.
- Sun, J., Birmili, W., Hermann, M. et al., 2020: Decreasing trends of particle number and black carbon mass concentrations at 16 observational sites in Germany from 2009 to 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics* **20**, 11, 7049–7068, DOI: 10.5194/acp-20-7049-2020.
- Sun, J., Hermann, M., Yuan, Y. et al., 2021: Long-term trends of black carbon and particle number concentration in the lower free troposphere in Central Europe. *Environmental Sciences Europe* **33**, 1, 47, DOI: 10.1186/s12302-021-00488-w.
- Templ, B., Koch, E., Bolmgren, K. et al., 2018: Pan European Phenological database (PEP725): a single point of access for European data. *Inter-*

- national Journal of Biometeorology*, **62**, 6, 1109–1113, DOI: 10.1007/s00484-018-1512-8.
- Umweltbundesamt, 2019: Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 276 pp.
- UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (Hrsg.), 2016: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde. Abruf am: 28.04.2023, URL: <http://www.icp-forests.net/page/icp-forests-manual>.
- UNFCCC, 2000: Report of the Conference of the Parties on its fifth session, held at Bonn from 25 October to 5 November 1999. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its fifth session. FCCC/CP/1999/6/Add.1. Decision 5/CP.5. Abruf am 28.04.2023, URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop5/06a01.pdf>.
- UNFCCC, 2022a: Draft decision -/CP.27 Implementation of the Global Climate Observing System. Abruf am: 28.04.2023, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop27_auv_RSO.pdf.
- UNFCCC, 2022b: Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. Fifty-seventh session. Sharm el-Sheikh, 6–12 November 2022. Agenda item 10(a). Matters related to science and review. Research and systematic observation. Draft conclusions proposed by the Chair. Abruf am 28.04.2023, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbsta2022_L20E.pdf.
- Vaisala, 2022: Global Lightning Dataset GLD360. Abruf am: 28.04.2023, URL: <https://www.vaisala.com/en/products/systems/lightning/gld360>.
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Hendricks-Franssen, H.-J., Brüggemann, N., Bogen, H.R., Kollet, S., Javaux, M., van der Kruk, J., Vanderborght, J., 2015: Soil hydrology: recent methodological advances, challenges, and perspectives. *Water Resources Research* **51**, 4, 2616–2633. DOI: 10.1002/2014WR016852.
- Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., Haigh, I., 2011: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dynamics* **61**, 5, 701–715, DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x.
- Wapler, K., 2013: High-resolution climatology of lightning characteristics within Central Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics* **122**, 3, 175–184, DOI: 10.1007/s00703-013-0285-1.
- Wegehenkel, M., Luzi, K., Sowa, D., Barkusky, D., Mirschel, W., 2019: Simulation of Long-Term Soil Hydrological Conditions at Three Agricultural Experimental Field Plots Compared with Measurements. *Water* **11**, 5, 989, DOI: 10.3390/w11050989.
- Wellbrock, N., Bolte, A., Flessa, H. (Hrsg.), 2016: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. *Thünen Report* **43**. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 558 pp, DOI: 10.3220/REP1473930232000.
- WMO, 1990: Second World Climate Conference. International Conference Centre, Geneva, Switzerland, 29 October–7 November 1990: Abstracts of Scientific/technical Papers. World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 87 pp.
- WMO, 2003a: Fourteenth World Meteorological Congress. Geneva, 5–14 May 2003. Abridged Final Report with Resolutions. WMO-No. 960. World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 233 pp.
- WMO, 2003b: The Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC. April 2003. GCOS-82 (WMO/TD No. 1143). World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 85 pp.
- WMO, 2010: Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC (2010 Update). August 2010. GCOS-138 (GOOS-184, GTOS-76, WMO-TD/No. 1523). World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 186 pp.
- WMO, 2015: Seventeenth World Meteorological Congress, Geneva, 25 May–12 June 2015. Abridged Final Report with Resolutions. WMO-No. 1157. World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 708 pp.
- WMO, 2016: The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. GCOS-200 (GOOS-214). Abruf am: 28.04.2023, URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3417.
- WMO, 2022: The 2022 GCOS Implementation Plan GCOS-244 GOOS-272. Abruf am: 28.04.2023, URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11317.